

Análise numérica e energética de estratégias para controlo de uma janela electrocromática em escritórios

Carlos André Pereira Ferreira

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Szabolcs Varga



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2017

Resumo

Recentemente, tem existido um aumento significativo da energia consumida na climatização de espaços. Aproximadamente 60% da energia consumida em edifícios é gasta para arrefecimento, aquecimento, iluminação e ventilação do ambiente. Para além disso, grande parte da energia utilizada provém de fontes não renováveis de energia. Nesse sentido, há uma necessidade crescente do uso de equipamentos mais eficientes, do melhor aproveitamento da energia solar pelos componentes da envolvente do edifício e da utilização de energia proveniente de fontes renováveis de energia e com baixo impacto ambiental. Com o objetivo de melhorar o aproveitamento da energia solar pelos componentes da envolvente do edifício surgiram as janelas inteligentes. As janelas inteligentes permitem a modulação da transmissividade da janela, permitindo à janela apresentar um estado transparente, quando há necessidades de energia para aquecimento, e um estado escuro, para reduzir a transmissividade da mesma. A janela electrocromática é uma das tecnologias cuja modulação da transmissividade da janela é feita através da aplicação de uma tensão elétrica, que permite a definição de estratégias de controlo baseadas em diferentes critérios. O presente trabalho visa a avaliação do potencial para a redução do consumo de energia pela substituição de uma janela convencional por uma janela electrocromática. É objetivo também deste estudo o desenvolvimento de várias estratégias de controlo baseadas em ocupação, intensidade da radiação incidente, luminosidade média interior e temperatura ambiente.

Deste modo, neste trabalho analisa-se numericamente o efeito de 6 diferentes estratégias de controlo de uma janela electrocromática (3 m²) no consumo de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação de um escritório em 6 configurações, localizado na cidade italiana de Palermo. A cidade italiana de Palermo foi escolhida uma vez que tem condições climáticas que se consideraram vantajosas para o desempenho da janela electrocromática na redução do consumo energético anual, provocando consumos de energia para arrefecimento superiores aos consumos de energia para aquecimento. As estratégias de controlo foram elaboradas com base: na ocupação e na necessidade de energia para aquecimento; ocupação e a intensidade de radiação incidente no plano da janela; ocupação e previsão de 2 h da intensidade de radiação incidente na janela; ocupação e intensidade de radiação incidente no plano horizontal; ocupação e previsão de 2 h da intensidade de radiação incidente; e ocupação, luminosidade média interior e temperatura exterior. O modelo foi desenvolvido no *software* TRNSYS em regime transiente. O estudo foi elaborado considerando uma janela electrocromática, da marca SAGE, cujas propriedades termofísicas foram selecionadas através da base dos dados do *software* Window 7.4.

Os resultados do modelo desenvolvido foram validados pela comparação com dados da literatura. As diferenças encontradas no consumo de energia podem ser explicadas pelas diferenças nos dados meteorológicos, às incertezas nas propriedades das paredes e nos ganhos internos. Após a validação do modelo foram realizadas várias simulações para analisar o efeito da janela electrocromática e o seu controlo no consumo de energia em edifícios. Os resultados obtidos provaram que a utilização de uma janela electrocromática ao invés de uma janela de vidro duplo permite a redução da energia total consumida ao longo de um ano. A poupança energética é tanto maior quanto maior for a diferença entre a radiação incidente no verão e no inverno, tendo-se obtido uma redução anual total entre 68 kWh (2,5%) e 650 kWh (19,2%). Do mesmo modo se verificou, que o critério que apresenta melhores resultados é o critério pela luminosidade média interior, temperatura exterior e ocupação. As restantes estratégias de controlo também apresentaram bons resultados, mas de forma sazonal. Foi concluído que existe ainda uma necessidade de melhorar os controladores no futuro.

Numerical and energetic analysis of control strategies for an electrochromic window in an office

Abstract

Nowadays, there has been an increase of energy consumption in buildings to assure visual and thermal comfort of the occupants. About 60% of the total energy is used for space cooling, heating, lighting and air-conditioning. In addition, most of this energy still comes from non-renewable sources. Therefore, there is a growing need for the usage of more efficient equipment and the improvement of the building envelope exposed to solar radiation, as well as, to increase the share of energy from renewable and more environmentally friendly sources. Smart-windows can actively change their optical properties such as visible and solar transmittance. The application of such windows may lead to considerable reduction in the energy consumption of buildings e.g. by reducing the need for space cooling. Electrochromic smart-windows change their properties as a response to the application of an external electric potential. The present work aims to evaluate the effect of an electrochromic window in the reduction of the total energy consumption when compared to conventional fenestration. It is also a goal of this study to develop adequate control strategies based on average indoor illuminance, incident solar radiation, occupation schedule and outside temperature.

The focus of this numerical analysis was to study the effect of 6 different control strategies for an electrochromic window (3 m^2) on the energy consumption for space cooling, heating and lighting of an office with 6 different configurations. The Italian city of Palermo was chosen as geographical context because of its relatively hot climatic conditions resulting in a considerable amount of energy consumed for space cooling. The control strategies were formulated based on recommendations: occupation and heating need; occupation and incident radiation on the window plane; occupation and 2 hours forecast of the incident radiation on the window pane; occupation and incident radiation on the horizontal plane; occupation and 2 hours forecast of the solar radiation on the horizontal plane; occupation, average indoor illuminance and outside temperature. The dynamic simulation model was developed using the TRNSYS software. The electrochromic window tested, whose manufacturer was SAGE, was selected from the database of the Window 7.4 software.

First, the results were validated with available data published in the literature. The differences between the model predictions and the literature data for the energy consumption for cooling, heating and lighting were explained by the differences in meteorological data applied and by the uncertainties in the wall properties and internal gains. After validating the model, the simulations were run, in order to investigate the effect of electrochromic windows and their control strategy on the energy consumption of the building. The results show that the use of electrochromic windows, instead of the conventional ones, can reduce the annual total energy consumption. The savings increase with the difference of total radiation on the window surface between summer and winter. For the control strategy based on occupation, average indoor illuminance and outside temperature the reduction on energy consumption varies between 68 kWh (2.5%) and 650 kWh (19.4%). Other strategies result in better energy consumptions, on the seasonally basis. It was concluded that, although the potential of smart-windows technology is demonstrated, there is a need for control strategy optimization.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Szabolcs Varga pela grande disponibilidade e ajuda durante a realização da dissertação.

Gostaria também de agradecer à minha família, namorada e amigos pelo apoio e incentivo.

A todos um muito obrigado.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Identificação do problema	1
1.2	O papel de janelas e superfícies envidraçadas em edifícios	4
1.2.1	Coeficiente global de transferência de calor	5
1.2.2	Propriedades óticas dos vidros	6
1.2.3	Breve introdução do espectro solar	6
1.3	Envidraçado de baixa emissividade	9
1.4	Janelas inteligentes	9
1.5	Objetivos	10
1.6	Estrutura da dissertação	10
2	Classificação das tecnologias existentes de janelas inteligentes	13
2.1	Propriedades importantes das janelas	13
2.2	Tecnologias existentes de janelas inteligentes	14
2.2.1	Dispositivos cromáticos	15
2.2.1.1	Dispositivos termocromáticos	15
2.2.1.2	Dispositivos fotocromáticos	17
2.2.1.3	Dispositivos electrocromáticos	17
2.2.1.4	Dispositivo gasocromático	18
2.2.2	Dispositivo de cristais líquido disperso	19
2.2.3	Dispositivo de partículas suspensas (SPD)	20
2.3	Composição e comportamento de envidraçados electrocromático	21
2.3.1	Condutores transparentes de dispositivos electrocromáticos	21
2.4	Camada eletrólito/condutor iónico de dispositivos electrocromáticos	23
2.5	Filmes electrocromáticos	23
3	Desenvolvimento do modelo de simulação e estratégias de controlo	31
3.1	Descrição do edifício	31
3.2	Estratégias de controlo de modulação da janela electrocromática	35
3.2.1	Estratégia com base na ocupação e necessidade de aquecimento (Controlo 1)	35
3.2.2	Estratégia com base na radiação incidente na janela (Controlo 2)	36
3.2.3	Estratégia de com base na previsão da radiação (Controlo 3)	37
3.2.4	Estratégia de controlo com base na radiação incidente no plano horizontal (Controlo 4)	38
3.2.5	Estratégia com base na previsão da radiação incidente no plano horizontal (Controlo 5)	38
3.2.6	Estratégia de controlo com base na luminosidade média interior e na temperatura exterior (Controlo 6)	39
4	Implementação do modelo em TRNSYS	41
4.1.1	Dados meteorológicos (Type 15-6)	42
4.1.2	Edifício	42
4.1.3	Implementação do controlador da iluminação (função BRIGHT)	42
4.1.4	Implementação do controlador da modulação da janela electrocromática	43
4.1.5	Implementação das estratégias de controlo 3 e 5	44
5	Resultados obtidos	45
5.1	Validação do modelo TRNSYS	45
5.2	Análise dos resultados das simulações	53
5.2.1	Resultados das simulações para a configuração a) do escritório	53
5.2.1.1	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração a)	55
5.2.1.2	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração a)	57
5.2.1.3	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação da configuração a)	58
5.2.1.4	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração a)	59
5.2.2	Resultados das simulações para a configuração b) do escritório	61
5.2.2.1	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração b)	62
5.2.2.2	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento da configuração b)	64

5.2.2.3	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação da configuração b)	65
5.2.2.4	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total da configuração b)	67
5.2.3	Resultados das simulações para a configuração c) do escritório	68
5.2.3.1	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração c)	69
5.2.3.2	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração c)	70
5.2.3.3	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação na configuração c)	72
5.2.3.4	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração c)	73
5.2.4	Resultados das simulações para a configuração d) do escritório	75
5.2.4.1	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração d)	75
5.2.4.2	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração d)	76
5.2.4.3	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação na configuração d)	78
5.2.4.4	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração d)	79
5.2.5	Resultados das simulações para a configuração e) do escritório	80
5.2.5.1	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração e)	81
5.2.5.2	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração e)	82
5.2.5.3	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação na configuração e)	83
5.2.5.4	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração e)	84
5.2.6	Resultados das simulações para a configuração f) do escritório	86
5.2.6.1	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração f)	87
5.2.6.2	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento da configuração f)	89
5.2.6.3	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação para a configuração f)	90
5.2.6.4	Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total para a configuração f)	91
6	Conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros	93
6.1	Conclusões gerais	93
6.2	Sugestões para trabalho futuro	94
	Referências	97
ANEXO A:	Tabelas de consumo de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total ao longo do ano	103

Abreviações e nomenclatura

Abreviações

EC	Estratégia de Controlo
ECr	Electrocromismo/Electrocromática
FC	Fotocromismo/fotocromática
GT	<i>Greater than</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
LSPR	<i>Localized Surface Plasmon Resonance</i>
NIR	<i>Near-Infrared Radiation</i>
PDLC	Dispositivo polimérico de cristais líquidos
SHGC	<i>Solar Heat Gain Coefficient</i>
SPD	Dispositivo de partículas suspensas
S-W	<i>Smart-Windows</i>
TC	Termocromismo/Termocromática

Nomenclatura

A	Área	[m ²]
c	Velocidade da luz	[m/s]
CIE	Eficiência de coloração	[m ² /C]
C _p	Calor específico	[J/(kgK)]
D	Coefficiente de difusão de iões	[m ² /s]
E	Luminosidade	[lm/ m ²]
e	Parâmetro de transparência do céu	
F'	Coefficiente de brilho	
G	Irradiação	[W]
g	Fator Solar	
h	Constante de Planck	[J.s]
k	Condutividade térmica	[W/(m.K)]
k _b	Constante de Boltzmann	[J/K]
I	Intensidade de radiação	[W/m ²]
\dot{Q}	Potência calorífica	[W]
R	Quadrado da refletividade	

R_{sol}	Refletividade solar	
T	Temperatura	[°C]
T_{sol}	Transmissividade à radiação solar	
T_v	Transmissividade à radiação visível	
t	Tempo	[s]
U	Coefficiente global de transferência de calor	[W/(m ² K)]
V	Volume	[m ³]

Símbolos do alfabeto grego

Δ	Parâmetro de brilho	
ε	Emissividade	
λ	Comprimento de onda	[m]
ν	Frequência de onda	[Hz]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]

Índice de Figuras

Figura 1- Zonas de conforto térmico para duas situações diferentes (1,1 met e 1,0 clo; 1,1 met e 0,5 clo) [7].	2
Figura 2 - Radiação incidente numa superfície semitransparente [15].	7
Figura 3 - Espectro do poder emissivo de um corpo negro [15].	8
Figura 4 - Esquema de uma janela de baixa emissividade (1- vidro; 2- ar; 3-camada de material de baixa emissividade).	9
Figura 5 - Sequência de mudança das propriedades óticas de um vidro laminado electrocromático [18].	10
Figura 6 - Esquema representativo da resposta de um material termocromático, aplicado numa janela, à radiação, nas suas duas fases [27].	16
Figura 7 - Esquema de janela gasocromática [41].	18
Figura 8 - Esquema de janela de cristal líquido disperso: A – modo opaco (corrente desligada), B – modo transparente (corrente ligada) [52].	20
Figura 9 - Esquema de envidraçado baseado na tecnologia de Partículas Suspensas (A – Estado opaco (desligado), B – Estado transparente (ligado) [54].	21
Figura 10 - Esquema de um dispositivo electrocromático (1-vidro; 2-condutor transparente; 3- Filme electrocromático/Armazenador de iões; 4- Eletrolito; 5- Filme electrocromático).	21
Figura 11 - Valores de transmissividade para comprimento de onda de 550 nm em função da resistência elétrica para vários condutores transparentes [56].	22
Figura 12 - Tabela periódica com caracterização dos elementos em: suscetíveis de formar óxidos catódicos, óxidos anódicos, ambos ou nenhum [1].	23
Figura 13 - Eficiência de coloração do óxido de Níquel [23].	24
Figura 14 - Corrente em função da tensão para filmes compósitos WO ₃ · H ₂ O, 10 wt % PVDF, e 0-15% nano ITO [62].	25
Figura 15 - Coeficiente de difusão de iões em função da percentagem de ITO [62].	26
Figura 16 - Transmissividade no estado transparente (4V) e colorido (1,5V - AZO e 2V - ITO) para filmes de nano cristais de AZO (preto) e ITO (vermelho) com espessura de 2435±30 nm e 316 ± 10 nm e diâmetro dos nano cristais de 9,0 ± 1,5 nm e 5,0 ± 1,0 nm respetivamente [66].	27
Figura 17 - Espectro de absorção ótica para um filme de nano cristais de WO _{3-x} [64].	27
Figura 18 - Espectro da transmissividade de filmes óxido de nióbio produzido por MS e SG: transparente a 4V e colorido a 1,2 V [68].	28
Figura 19 - Modos de operação de filme de nanocompósito (nano cristais de WO _{3-x} e NbO _x).	29
Figura 20 - (a) Espectro da transmissividade do filme nanocompósito de 260nm WO _{3-x} -NbO _x num vidro revestido com ITO. (b) Perfil normalizado de carga seguindo os passos potencioestáticos para 3 filmes diferentes. (c) Diagrama de energia esquemático mostrando o movimento de carga no compósito. (d) Perfil normalizado de carga para os mesmos 3 filmes depois de 2000 ciclos.	29
Figura 21 - Configuração dos diferentes edifícios simulados (adaptado de [5]).	32
Figura 22 - Estratégia de controlo 1 / Aquecimento + Ocupação.	36
Figura 23 - Estratégia de controlo 2 / Ocupação + Radiação incidente no plano do envidraçado.	37
Figura 24 - Estratégia de controlo 3 / Ocupação + Radiação incidente no plano do envidraçado 2h depois.	37
Figura 25 -Estratégia de controlo 4 / Ocupação + Radiação incidente no plano horizontal.	38
Figura 26 - Estratégia de controlo 5 / Ocupação + Radiação incidente no plano do horizontal 2h depois.	39
Figura 27 - Estratégia de controlo 6 / Ocupação + Luminosidade média interior + Temperatura exterior.	40

Figura 28 – Representação do final no simulation studio do TRNSYS com todos os seus componentes.	41
Figura 29 – Modelo final do ficheiro TRNSYS com implementação das estratégias de controlo 3 e 5.	44
Figura 30 - Ângulo que o plano normal à superfície envidraçada faz com a altura solar média mensal às 12h para as configurações a), b), c) e d)	47
Figura 31 - Ganhos solar total mensal através da janela de baixa emissividade na configuração d) ...	48
Figura 32 – Consumo de energia mensal para arrefecimento, aquecimento e iluminação com janela de vidro de baixa emissividade na configuração d)	49
Figura 33 –Radiação média mensal horária incidente no plano vertical (A – meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).	54
Figura 34 – Radiação média mensal horária incidente no plano horizontal (A - meses de aquecimento; B - meses de arrefecimento).	55
Figura 35 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 90°.	56
Figura 36 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 90°.	57
Figura 37 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 90°.	59
Figura 38 – Necessidade de energia ao longo do ano com a janela orientada a sul com inclinação de 90°.	60
Figura 39 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B - meses de arrefecimento).	62
Figura 40 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.	63
Figura 41 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.	64
Figura 42 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.	66
Figura 43 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.	67
Figura 44 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).	69
Figura 45 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 30°.	70
Figura 46 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 30°.	71
Figura 47 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação a 30°.	73
Figura 48 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 30°.	74
Figura 49 - Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela no plano horizontal.	76
Figura 50 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela no plano horizontal.	77
Figura 51 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela no plano horizontal.	78
Figura 52 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela no plano horizontal.	79
Figura 53 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).	81

Figura 54 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°	82
Figura 55 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°	83
Figura 56 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°	84
Figura 57 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°	85
Figura 58 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).	87
Figura 59 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°	88
Figura 60 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°	89
Figura 61 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°.	90
Figura 62 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°	91

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Distribuição do consumo de energia por aplicação nos Estados Unidos em 2006 em edifícios residenciais [9]	3
Tabela 2 - Percentagem de energia proveniente de fontes renováveis de energia utilizadas para aquecimento e arrefecimento [10]	3
Tabela 3 - Percentagem de energia proveniente de fontes renováveis de energia consumida através de eletricidade entre 2004 e 2015 [10].....	4
Tabela 4 – Coeficiente global de transferência de calor de alguns tipos de paredes e superfícies envidraçadas [14]	6
Tabela 5 – Resumo das diferentes tecnologias de janelas inteligentes.....	15
Tabela 6 - Desempenho ótico ideal de uma janela termocromática [[6, 32]	16
Tabela 7 - Informação relativa à área máxima, coeficiente global de transferência de calor, intervalo de modulação e número de ciclos garantidos de algumas janelas electrocromáticas comerciais [18]	18
Tabela 8 – Informação geral à cerca de alguns dispositivos gasocromáticos como a área, intervalo de modulação da transmissividade ou refletividade, número de ciclos expectável e tempo de resposta a colorar e a descolorar [18]	19
Tabela 9 – Propriedades termofísicas dos materiais utilizados no modelo desenvolvido	32
Tabela 10 - Propriedades das superfícies da envolvente quanto à radiação e à convecção [8].....	33
Tabela 11 – Propriedades térmicas dos diferentes tipos de envidraçado utilizados.....	33
Tabela 12 – Horário semanal do número de ocupantes no escritório.....	34
Tabela 13 – Dados referentes à atividade metabólica dos indivíduos [72]	34
Tabela 14 - Volume, taxa de infiltração, área de superfícies interiores e exteriores, da janela, do chão e do telhado	34
Tabela 15 - Parâmetros de controlo utilizados	40
Tabela 16 - Ganhos solares para a janela de vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade obtidos nas simulações [5]	45
Tabela 17 - Propriedades térmicas das janelas de vidro duplo e de vidro duplo de baixa emissividade	46
Tabela 18 - Temperatura máxima mensal, temperatura mínima mensal, temperatura média mensal às 7h e temperatura média exteriores durante horário de trabalho em cada mês	49
Tabela 19 – Consumo anual de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total para a janela de vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade para as configurações a), b), c) e d)	52
Tabela 20 – Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação com janela orientada para sul e com inclinação de 90°	61
Tabela 21 - Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para sul e com inclinação de 60°	68
Tabela 22 - Resultados dos consumos anuais de energia arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para sul com inclinação de 30°	74
Tabela 23 - Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para sul com inclinação de 0°	80
Tabela 24 - Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para oeste com inclinação de 90°	86
Tabela 25 – Resultados dos consumos anuais de energia arrefecimento, em aquecimento e em iluminação com janela orientada para este com inclinação de 90°.....	92

1 Introdução

1.1 Identificação do problema

Atualmente, vivemos num mundo com o qual não estamos em harmonia. A população cresceu de aproximadamente mil milhões em 1800 para 2,5 mil milhões em 1950, tendo já atingido os 7 mil milhões [1]. As previsões apontam para que o crescimento irá continuar com a mesma taxa pelo menos até 2100 [2]. Paralelamente ao crescimento exponencial da população, também tem havido um aumento da qualidade de vida e do conforto da população. O resultado desta evolução é o uso exagerado, ineficiente e não sustentável dos recursos globais: água, energia, minerais, entre outros [1].

A energia é um dos principais fatores na geração de riqueza, crescimento económico e desenvolvimento social em todos os países [3]. O aumento das necessidades energéticas da população leva a que seja importante fazerem-se esforços para que a energia seja utilizada de modo mais eficiente e para que se utilizem fontes renováveis de energia [3]. Grande parte da energia consumida tem origem, ainda, na queima de combustíveis fósseis e carvão, libertando-se grandes quantidades de dióxido de carbono e outros gases prejudiciais para a saúde das pessoas e para a natureza como a conhecemos. Entre os efeitos prejudiciais encontra-se o aquecimento global, a subida da altura do nível do mar, climas mais severos, aumento do risco de propagação de doenças, migração em massa de algumas espécies, entre muitos outros[1]. O efeito do aquecimento global é mais sentido nas grandes cidades, onde se concentra grande parte da população, resultando na concentração de gases de efeito de estufa. Deste modo, para além da diminuição da qualidade do ar, geram-se “ilhas urbanas de calor” com temperaturas bastante mais elevadas do que nas suas vizinhanças [1].

O alvo para a evolução do consumo de energia, nos países europeus, foi estabelecido pela diretiva 2012/27/EU do Parlamento Europeu [4], incluído metas para a redução de energia primária, bem como objetivos para a redução das emissões de CO₂ [4]. Para além disso, os edifícios são vistos como o setor com maior potencial de economia de energia, sendo que está previsto um aumento da taxa de renovação de edifícios [4]. Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% da energia total consumida na Europa, e consequentemente contribuem para aproximadamente 36% das emissões CO₂ [5]. Uma grande parte da energia utilizada para manter o conforto térmico em edifícios é consumida pelos instrumentos HVAC [6]. Na verdade, a sensação de conforto térmico é fundamental e vista como uma prioridade para a população.

O conforto térmico é a sensação mental de satisfação com o ambiente térmico [7]. O conforto térmico depende assim do balanço de energia do corpo humano, ou seja, depende da taxa metabólica do indivíduo (produção de calor), da roupa que o indivíduo está a usar (condução), a temperatura do ar (convecção), a temperatura média radiante (radiação), a velocidade do ar

(radiação) e a humidade [7]. O conforto térmico é também influenciado por fatores fisiológicos e psicológicos [8]. Como tal, o alcance do estado de conforto para um indivíduo poderá ser a uma temperatura diferente, dependendo da roupa que este está a usar, da sua taxa de metabolismo e do seu estado de espírito. Apesar disso, é possível definir um intervalo de temperaturas para as quais 80% das pessoas sentem-se confortáveis. Na Figura 1, está representado um gráfico fornecido pela ASHRAE que define as zonas de conforto térmico, para duas situações diferentes quanto ao metabolismo e quanto à quantidade de roupa.

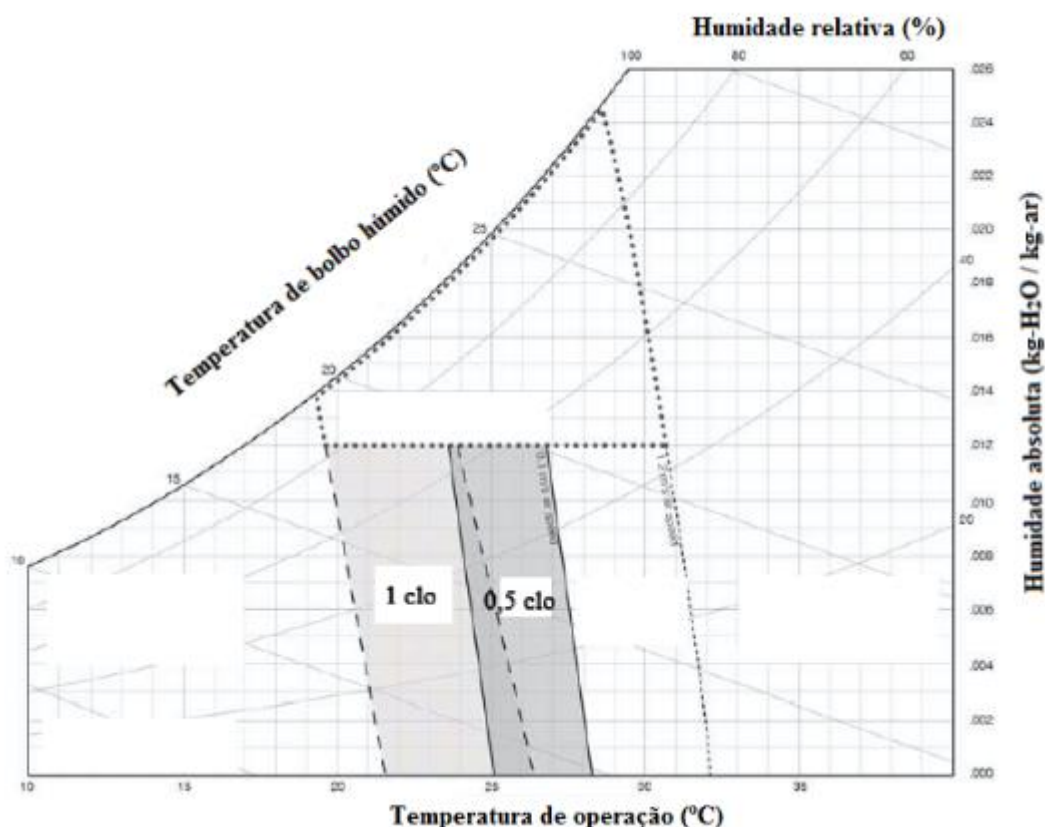


Figura 1- Zonas de conforto térmico para duas situações diferentes (1,1 met e 1,0 clo; 1,1 met e 0,5 clo) [7].

A introdução de sistemas de ar condicionado em edifícios, embora contribua para a melhoria da qualidade do ar interior (renovação do ar e o controlo da temperatura e humidade relativa), também tem bastantes aspetos negativos. Desses aspetos negativos destaca-se o consumo de energia que estes representam, assim como a emissão de gases CO₂ [1]. Por outras palavras, para controlarmos o ambiente no interior de um edifício, contribuimos para o aumento dos efeitos do aquecimento global, levando a que por sua vez seja necessário consumir mais energia para manter o ambiente dentro dos edifícios dentro dos limites do conforto térmico. De facto, aproximadamente 60% de toda a energia usada nos edifícios foi consumida para aquecimento e arrefecimento do ambiente, iluminação e ventilação em 2010 [6]. Na Tabela 1, apresenta-se a distribuição do consumo de energia por aplicação em casas residenciais nos Estados Unidos, referente ao ano de 2006. Como é possível verificar pela Tabela 1, a maioria da energia consumida foi utilizada para aquecimento, arrefecimento e iluminação do ambiente interior (57%).

Tabela 1 – Distribuição do consumo de energia por aplicação nos Estados Unidos em 2006 em edifícios residenciais [9]

Aquecimento do ambiente	32%
Arrefecimento do ambiente	13%
Aquecimento de água	13%
Iluminação	12%
Refrigeração	8%
Eletrónica	8%
Outros	14%

Em 2015, as necessidades de aquecimento e arrefecimento foram, geralmente, atendidas pelo recurso a fontes não renováveis de energia (66,6%, em Portugal) como pode ser observado na Tabela 2. Do mesmo modo, a eletricidade disponível para consumo nos imóveis provém ainda de fontes não renováveis de energia (47,4%). No entanto, em relação à eletricidade tem se visto um crescimento mais acentuado da percentagem de energia proveniente de fontes renováveis de energia, como se pode ver na Tabela 3.

Tabela 2 - Percentagem de energia proveniente de fontes renováveis de energia utilizadas para aquecimento e arrefecimento [10]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EU-28	10.2	10.9	11.4	12.8	13.1	14.7	14.9	15.6	16.4	16.9	18.1	18.6
Belgium	2.9	3.4	3.7	4.5	5.0	6.0	6.1	6.6	7.3	7.4	7.7	7.6
Bulgaria	14.1	14.3	14.8	13.9	17.3	21.7	24.4	24.9	27.5	29.2	28.3	28.6
Czech Republic	9.9	10.9	11.2	12.4	12.9	14.3	14.1	15.4	16.3	17.6	19.6	19.8
Denmark	20.6	22.8	23.8	26.9	28.1	29.5	31.0	32.3	33.6	34.9	37.9	39.6
Germany	6.3	6.8	7.0	8.4	7.4	9.2	9.8	10.5	10.4	10.6	12.2	12.9
Estonia	33.2	32.2	30.7	32.7	35.5	41.8	43.3	44.1	43.1	43.2	45.2	49.6
Ireland	2.9	3.5	3.6	3.9	3.6	4.3	4.5	5.0	5.1	5.4	6.6	6.4
Greece	12.8	12.8	12.5	14.4	14.3	16.5	17.9	19.4	23.4	26.5	26.9	25.9
Spain	9.5	9.4	11.4	11.3	11.7	13.3	12.6	13.6	14.1	14.1	15.7	16.8
France	12.3	12.2	11.5	12.5	13.0	14.9	15.8	16.0	16.9	17.9	18.8	19.8
Croatia	29.4	30.0	29.1	29.2	28.6	31.2	32.8	33.7	36.5	37.2	36.2	38.6
Italy	5.7	8.2	10.1	13.3	15.3	16.4	15.6	13.8	17.0	18.1	18.9	19.2
Cyprus	9.3	10.0	10.4	13.1	14.5	16.3	18.2	19.2	20.7	21.6	21.6	22.5
Latvia	42.5	42.7	42.6	42.4	42.9	47.9	40.7	44.7	47.3	49.7	52.2	51.8
Lithuania	30.4	29.3	29.2	29.1	32.0	33.7	32.5	32.8	34.5	36.9	40.6	46.1
Luxembourg	1.8	3.6	3.6	4.4	4.6	4.7	4.7	4.8	5.0	5.5	7.2	6.9
Hungary	6.5	6.0	7.5	8.9	8.3	10.5	18.1	20.1	23.3	23.7	21.2	21.3
Malta	1.1	2.2	2.6	3.2	3.6	1.8	7.8	12.2	13.2	15.7	14.5	14.1
Netherlands	2.2	2.4	2.8	3.0	3.1	3.4	3.1	3.7	3.9	4.1	5.2	5.5
Austria	20.1	22.3	23.0	25.6	25.9	27.6	29.5	30.0	30.9	32.7	32.0	32.0
Poland	10.2	10.2	10.2	10.5	10.9	11.5	11.7	13.1	13.4	14.1	14.0	14.3
Portugal	32.5	32.1	34.2	35.0	37.5	38.0	33.9	35.2	33.2	34.6	34.0	33.4
Romania	17.6	18.0	17.6	19.4	23.2	26.4	27.2	24.3	25.8	26.2	26.7	25.9
Slovenia	18.4	18.9	18.6	20.4	19.2	27.6	28.1	30.3	31.5	33.4	32.4	34.1
Slovak Republic	5.1	5.0	4.5	6.2	6.1	8.2	7.9	9.3	8.8	7.9	8.9	10.8
Finland	39.5	39.1	41.4	41.4	43.3	43.1	44.2	45.9	48.3	50.7	51.9	52.8
Sweden	46.7	51.9	56.4	58.7	61.1	63.6	60.9	62.2	65.8	67.1	68.0	68.6
United Kingdom	0.7	0.8	0.9	1.0	1.9	2.3	2.7	3.0	3.2	4.0	4.7	5.5
Iceland	52.3	53.4	56.9	58.6	62.0	62.1	63.9	65.2	64.6	59.0	58.2	63.4
Norway	25.5	28.8	28.4	29.3	30.8	31.8	32.6	33.8	33.2	32.7	31.7	33.8
Albania	34.2	39.1	31.0	33.5	38.8	34.7	31.7	32.0	39.1	37.8	31.0	34.6
Montenegro		52.9	51.4	49.1	46.0	62.1	76.5	81.4	79.9	68.6	67.7	68.6
FYR of Macedonia	23.4	24.7	24.9	22.5	24.6	29.2	26.5	27.3	29.6	31.8	35.0	35.8
Turkey	17.7	17.1	15.3	14.7	14.9	15.8	14.6	12.2	11.8	12.7	12.4	12.2

Tabela 3 - Percentagem de energia proveniente de fontes renováveis de energia consumida através de eletricidade entre 2004 e 2015 [10]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
EU-28	14.3	14.8	15.4	16.1	17.0	19.0	19.7	21.7	23.5	25.4	27.5	28.8
Belgium	1.7	2.4	3.1	3.6	4.6	6.2	7.1	9.1	11.3	12.5	13.4	15.4
Bulgaria	9.1	9.3	9.3	9.4	10.0	11.3	12.7	12.9	16.1	18.9	18.9	19.1
Czech Republic	3.6	3.7	4.0	4.6	5.2	6.4	7.5	10.6	11.7	12.8	13.9	14.1
Denmark	23.8	24.6	24.0	25.0	25.9	28.3	32.7	35.9	38.7	43.1	48.5	51.3
Germany	9.4	10.5	11.8	13.6	15.1	17.4	18.1	20.9	23.6	25.3	28.2	30.7
Estonia	0.6	1.1	1.5	1.5	2.1	6.1	10.4	12.3	15.8	13.0	14.1	15.1
Ireland	6.0	7.2	8.7	10.4	11.2	13.4	14.6	17.4	19.7	21.0	22.9	25.2
Greece	7.8	8.2	8.9	9.3	9.6	11.0	12.3	13.8	16.4	21.2	21.9	22.1
Spain	19.0	19.1	20.0	21.7	23.7	27.8	29.8	31.6	33.5	36.7	37.8	36.9
France	13.8	13.7	14.1	14.3	14.4	15.1	14.8	16.3	16.4	16.9	18.3	18.8
Croatia	35.5	35.6	35.0	34.0	33.9	35.9	37.6	37.6	38.8	42.1	45.3	45.4
Italy	16.1	16.3	15.9	16.0	16.6	18.8	20.1	23.5	27.4	31.3	33.4	33.5
Cyprus	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.6	1.4	3.4	4.9	6.6	7.4	8.4
Latvia	46.0	43.0	40.4	38.6	38.7	41.9	42.1	44.7	44.9	48.8	51.1	52.2
Lithuania	3.6	3.8	4.0	4.7	4.9	5.9	7.4	9.0	10.9	13.1	13.7	15.5
Luxembourg	2.8	3.2	3.2	3.3	3.6	4.1	3.8	4.1	4.6	5.3	5.9	6.2
Hungary	2.2	4.4	3.5	4.2	5.3	7.0	7.1	6.4	6.1	6.6	7.3	7.3
Malta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.1	1.6	3.3	4.2
Netherlands	4.4	6.3	6.5	6.0	7.5	9.1	9.6	9.8	10.4	10.0	10.0	11.1
Austria	61.8	62.0	62.2	64.3	65.3	67.9	65.7	66.0	66.5	68.0	70.1	70.3
Poland	2.2	2.7	3.0	3.5	4.4	5.8	6.6	8.2	10.7	10.7	12.4	13.4
Portugal	27.5	27.7	29.3	32.3	34.1	37.6	40.7	45.9	47.6	49.1	52.1	52.6
Romania	25.0	26.9	28.1	28.1	28.1	30.9	30.4	31.1	33.6	37.5	41.7	43.2
Slovenia	29.3	28.7	28.2	27.7	30.0	33.8	32.2	31.0	31.6	33.1	33.9	32.7
Slovak Republic	15.4	15.7	16.6	16.5	17.0	17.8	17.8	19.3	20.1	20.8	22.9	22.7
Finland	26.7	26.9	26.4	25.5	27.3	27.3	27.7	29.4	29.5	30.9	31.4	32.5
Sweden	51.2	50.9	51.8	53.2	53.6	58.3	56.0	59.9	60.0	61.8	63.2	65.8
United Kingdom	3.5	4.1	4.5	4.8	5.5	6.7	7.4	8.8	10.7	13.8	17.9	22.4
Iceland	93.1	94.9	93.5	113.7	90.8	92.9	92.4	93.9	95.4	96.7	97.1	93.1
Norway	97.3	96.8	100.2	98.5	99.6	104.7	97.9	105.5	104.4	106.9	110.3	106.4
Albania	63.0	72.1	74.2	79.6	73.3	70.7	74.6	66.1	72.4	62.7	71.0	79.2
Montenegro		39.1	37.7	37.6	38.3	46.6	45.7	41.6	42.8	49.1	51.4	49.6
FYR of Macedonia	14.5	14.0	14.0	13.7	13.9	15.5	15.8	14.8	16.7	18.2	19.3	21.7
Turkey	27.9	26.4	24.7	23.2	22.8	24.7	25.3	25.1	27.1	30.0	30.5	33.2

Em conclusão, é crucial atuar de modo a diminuir o consumo de energia em edifícios e diminuir as emissões de CO₂, promovendo uma utilização sustentável dos recursos existentes. Neste sentido, há duas abordagens passíveis de serem executadas: a otimização da eficiência dos instrumentos HVAC e da iluminação de um edifício ou a melhoria do desempenho térmico das superfícies da envolvente do edifício (paredes, telhado, superfícies envidraçadas) [6].

1.2 O papel de janelas e superfícies envidraçadas em edifícios

Este trabalho será focado na segunda abordagem, ou seja, na melhoria do desempenho térmico das superfícies da envolvente do edifício, em particular das janelas e superfícies envidraçadas. Estima-se que em 2016 a produção de vidro plano foi de cerca de 9,2 bilhões de m² [1]. Esta estimativa é um fator que atrai interesse no desenvolvimento de novas tecnologias, uma vez que indica que existe uma boa possibilidade de estas novas tecnologias ocuparem parte deste mercado, mesmo que seja uma porção pequena.

As superfícies envidraçadas são elementos de grande importância para garantir o conforto visual dentro de espaços fechados [1]. Estas permitem o contacto visual entre o exterior e o

interior e a entrada de luz solar, que já foram identificados como cruciais para a saúde e bem-estar das pessoas, assim como, para uma boa prestação no trabalho [1]. Devido às suas propriedades óticas estas possibilitam que uma quantidade substancial de radiação solar incida dentro dos edifícios, consistindo, assim, uma fonte de calor para os mesmos. No inverno, embora o calor que entra por radiação pelas superfícies envidraçadas possa ser benéfico, devido à sua baixa resistência térmica à condução estas permitem, também, perdas de energia significativas, principalmente durante a noite [11]. No verão, obriga à utilização de ar condicionado para arrefecimento, resultando assim em gastos de energias mais elevados [11]. O projeto de uma casa que gaste pouca energia deve ter em consideração o clima e a sua localização.

Por permitirem a entrada calor por radiação e por serem, normalmente, o elemento da envolvente com menor resistência térmica, as superfícies envidraçadas são uma das componentes mais vulneráveis de um edifício [12], sendo responsáveis por grandes perdas de energia, quando a temperatura exterior é muito inferior à temperatura interior, e por ganhos exagerados, quando sobre elas incide radiação solar e a temperatura interior ultrapassa os limites de conforto térmico [1, 6]. A sua ineficiência constitui, assim, um problema, uma vez que obriga a gastos energéticos, de modo a manter o conforto térmico. A solução para este problema, contudo, não passa pela eliminação ou diminuição das superfícies envidraçadas. Atendendo à importância das superfícies envidraçadas, conclui-se que a solução para o problema apresentado passará pela melhoria da performance térmica das superfícies envidraçadas [6].

1.2.1 Coeficiente global de transferência de calor

O envidraçado tem evoluído bastante desde que começou a ser utilizado em edifícios [12]. Há apenas algumas décadas atrás, o envidraçado disponível no mercado era formado por apenas uma camada de vidro, ou seja, as perdas energéticas por condução eram enormes [12]. De modo a melhorar a resistência térmica das superfícies envidraçadas, começaram a ser integrados, nos edifícios, envidraçados isolados, compostos por múltiplas camadas de vidro separadas por cavidades cheias com ar, ou gases nobres mais densos como Árgon, permitindo uma redução drástica da transferência de calor por condução e convecção através destas [12]. Apesar das melhorias feitas, as superfícies envidraçadas continuam a ser os componentes com o pior desempenho térmico na envolvente do edifício [12]. De modo a caracterizar as propriedades térmicas das superfícies envidraçadas usa-se, entre outras, o coeficiente global de transferência de calor definido por:

$$U = \Delta Q / (A \cdot \Delta T \cdot \Delta t) \quad (1)$$

O coeficiente global de transferência de calor caracteriza a capacidade de transferir calor de um objeto por unidade de área, de tempo e de diferença de temperatura, é frequentemente utilizado para definir a eficiência energética das superfícies envidraçadas [6]. Assim, quanto maior for o U de um objeto, pior desempenho térmico este tem. Na Tabela 4 apresenta-se alguns valores para o coeficiente global de transferência de calor de algumas superfícies envidraçadas, bem como de várias configurações. Como é possível notar pela Tabela 4, as superfícies envidraçadas têm valores de U bastante altos. Por exemplo, a janela de vidro duplo representa a entrada/saída de, pelo menos, 6 vezes mais calor do que uma parede isolada, para a mesma área.

Deste modo, o desenvolvimento urbano, que tem originado a construção de escritórios com áreas envidraçadas cada vez maiores, torna necessário procurar novas soluções. Entre as várias tecnologias emergentes encontram-se o “aerogel” que permite aumentar bastante a resistência à condução térmica, tendo um U de cerca de $0,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [13] e vidros ventilados que limitam a transferência de calor através do controlo da convecção [12].

Tabela 4 – Coeficiente global de transferência de calor de alguns tipos de paredes e superfícies envidraçadas [14]

Superfície da envolvente de um edifício	U ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)
Parede de tijolo	2
Parede dupla sem isolamento	1,5
Parede isolada	0,18
Madeira maciça	3
Vidro simples	4,8-5,8
Vidro duplo	1,2-3,7
Vidro triplo	<1

1.2.2 Propriedades óticas dos vidros

As propriedades óticas das superfícies envidraçadas são bastantes importantes no desempenho das janelas, quando sobre elas incide radiação, permitindo um bom conforto visual e ganhos térmicos. Para além disso, as propriedades óticas das janelas permitem a entrada de luz solar, permitindo menores consumos de iluminação. Entre as propriedades óticas destacam-se a emissividade, refletividade, absortividade e transmissividade. Estas propriedades quantificam a porção da radiação incidente numa superfície que é refletida (refletividade), absorvida (absortividade) e transmitida (transmissividade). A emissividade é dada pela razão entre a radiação que a superfície de um material emite e aquela que um corpo negro emitiria à temperatura que está a superfície.

1.2.3 Breve introdução do espectro solar

No contexto do presente trabalho, é importante considerar a radiação eletromagnética existente na nossa vizinhança. Todos os corpos emitem radiação. Para gases e sólidos semitransparentes, como o vidro, a emissão é um fenómeno volumétrico. No entanto, para grande parte dos corpos este fenómeno pode ser tratado como um fenómeno de superfície. Na Figura 2, está representado um meio semitransparente sobre o qual incide radiação (G_λ) com um determinado comprimento de onda, λ . Quando sobre uma superfície semitransparente incide radiação, esta é em parte transmitida, sendo que a restante ou é absorvida ou refletida. Quanto maior for a transmissividade da janela, maior será a transmissão de radiação para o interior do edifício, resultando em consumos de energia para arrefecimento superiores e menores consumos de energia para aquecimento. Do mesmo modo uma elevada transmissividade da janela poderá causar ofuscamento com mais frequência, mas também permitirá uma redução do consumo de energia para iluminação.

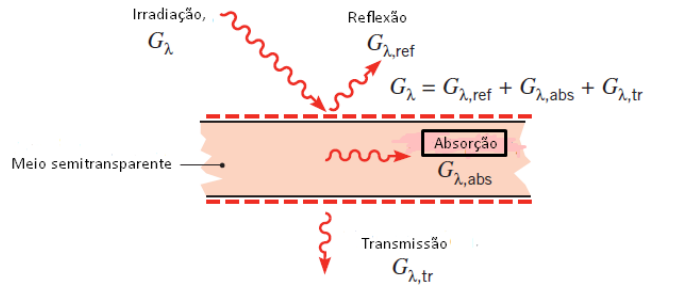


Figura 2 - Radiação incidente numa superfície semitransparente [15].

A radiação é vista como a propagação de ondas eletromagnéticas com frequência (ν) e comprimento de onda (λ). Estas duas propriedades estão relacionadas do seguinte modo:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2)$$

Na equação 2, c representa a velocidade da luz nesse meio. Dependendo do comprimento de onda, a radiação eletromagnética pode ser classificada em:

- Radiação gama ($\lambda < 10^{-4} \mu\text{m}$);
- Radiação X ($10^{-4} \mu\text{m} < \lambda < 10^{-2} \mu\text{m}$);
- Radiação ultravioleta ($10^{-2} \mu\text{m} < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$);
- Radiação visível ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$);
- Radiação infravermelha ($0,7 \mu\text{m} < \lambda < 10^2 \mu\text{m}$);
- Radiação micro-ondas ($\lambda > 10^2 \mu\text{m}$).

A radiação térmica que um corpo emite é tipicamente uma coleção (espectro) de ondas eletromagnéticas com vários comprimentos. A radiação dentro da gama de comprimentos de onda da radiação visível e infravermelha será a mais pertinente para os cálculos de ganhos solares. A intensidade da radiação que um corpo emite e transmite varia com o comprimento de onda, e o termo espectro é usado para se referir à natureza dessa dependência. Quer a intensidade da radiação para qualquer comprimento de onda, quer a distribuição do espectro dependem da temperatura. De modo a melhor entender a forma como varia o poder emissivo com o comprimento de onda, dever-se-á definir o conceito de corpo negro idealizado. Nenhum corpo emite mais radiação para um determinado comprimento de onda e temperatura do que um corpo negro. A intensidade de radiação (I) pode ser calculada em função do comprimento de onda e da temperatura através da lei de Planck definida por:

$$I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc_0}{\lambda T}} - 1)} \quad (3)$$

Na Figura 3 está representado a variação do poder emissivo com o comprimento de onda, considerando várias temperaturas do corpo negro, de acordo com a lei de Planck.

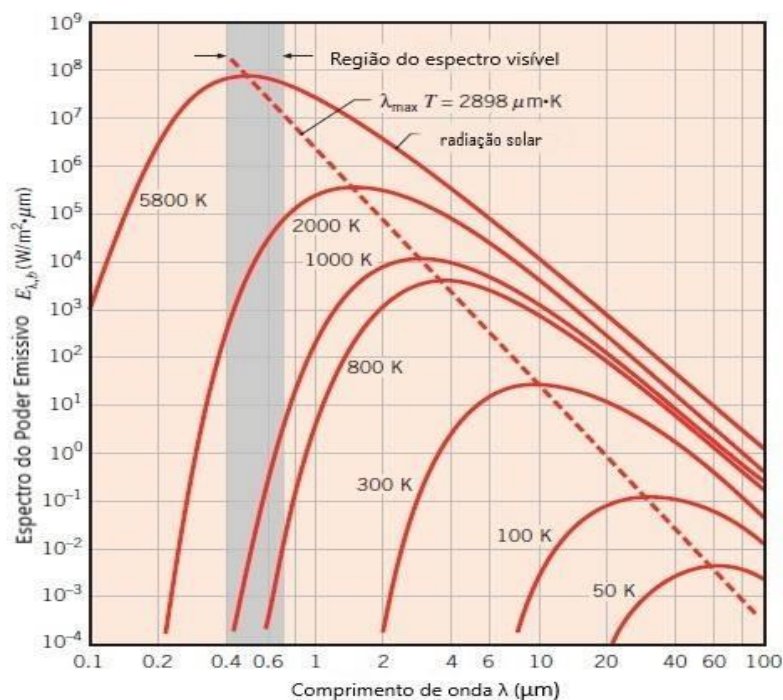


Figura 3 - Espectro do poder emissivo de um corpo negro [15].

Como podemos observar na Figura 3 e a equação 3 explica:

- A emissão de radiação varia com o comprimento de onda;
- Para um determinado comprimento de onda, a magnitude da radiação emitida aumenta com a temperatura;
- Quanto maior for a temperatura na superfície dum corpo mais intensamente este emite em comprimentos de onda mais pequenos;

A temperatura da superfície do sol é de cerca de 5800 K [15]. Embora o espectro solar não seja exatamente igual ao representado na Figura 3 para um corpo negro a 5800 K, este irá ser relativamente aproximado. Tendo isso em consideração, podemos observar que sol emite radiação em comprimentos de onda entre 0,3 e 3 μm . A radiação solar engloba assim 3 grupos: ultravioleta (comprimento de onda até 0,4 μm), visível (comprimento de onda entre 0,4 μm e 0,7 μm) e NIR (comprimento de onda de 0,7 μm a 3 μm). Por sua vez os corpos à temperatura de 20 °C emitem em comprimentos de onda superiores a 2 μm , ou seja, radiação infravermelha.

Como podemos verificar a radiação do ambiente é seletiva em termos de comprimento de onda e assim deverão ser as superfícies que desejem tirar o melhor partido dessa radiação. Por exemplo, poderá ser desejável que o material apresente propriedades óticas diferentes para a radiação visível e a radiação NIR.

Existem atualmente tecnologias para evitar ganhos excessivos por radiação nos edifícios como as persianas, cortinas e outros equipamentos de sombreamento (estáticos e dinâmicos).

Para além disso, têm surgido novas opções de superfícies envidraçadas que permitem controlar o fluxo de radiação que é transmitido para o interior incluído as janelas inteligentes que são o foco deste trabalho, sendo apresentadas na secção 1.4. Para além disso, existem também superfícies envidraçadas com baixa emissividade (*low-E*), que serão brevemente discutidas na próxima secção deste trabalho.

1.3 Envidraçado de baixa emissividade

As superfícies envidraçadas com baixa emissividade (*low-E*) são normalmente compostas por duas camadas de vidro separadas por uma camada de ar, tal como as janelas de vidro duplo [16]. No entanto, possuem na superfície exterior da camada interior de vidro um revestimento composto por uma camada de material com baixa emissividade [16]. Isto permite que a janela absorva a radiação incidente, mas que emita uma porção de radiação menor do que as janelas de vidro duplo. Uma boa superfície envidraçada com baixa emissividade deve ter uma boa transmissividade e uma baixa emissividade. Deste modo, permitirá a entrada do máximo de radiação possível e reterá a energia dentro do edifício, permitindo menores cargas de aquecimento. As janelas de baixa emissividade apresentam-se, assim, como uma escolha a ter em conta em locais em que a época de aquecimento causa gastos mais elevados do que a época de arrefecimento.

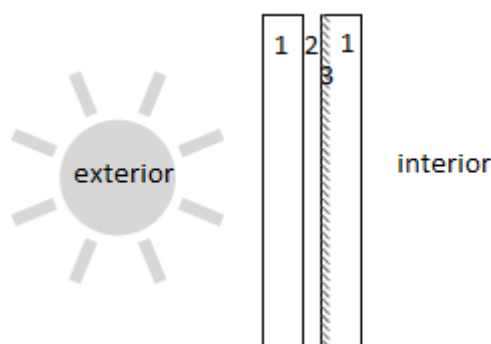


Figura 4 - Esquema de uma janela de baixa emissividade (1- vidro; 2- ar; 3-camada de material de baixa emissividade).

1.4 Janelas inteligentes

Como indica o nome, estas superfícies envidraçadas permitem um controlo inteligente da luz e da energia solar que entram no edifício. Estas caracterizam-se por permitir a mudança entre um modo transparente, ou seja, que permite a transmissão de energia para o interior como um vidro normal, e um estado mais escuro ou opaco que permite uma menor entrada de radiação. Assim, as janelas inteligentes (*Smart-Windows*) têm atraído bastante interesse uma vez que podem oferecer a um espaço interior um ganho solar elevado quando a temperatura é baixa, e um ganho solar menor quando a temperatura é elevada através da alteração entre os dois modos (ou mais). Para além disso, permite um uso eficiente da luz solar para iluminação contribuindo para um maior conforto dos utilizadores do espaço [17].

Na verdade, as janelas inteligentes têm a capacidade de mudar as suas propriedades óticas como a capacidade de transmitir radiação no espectro solar quando solicitadas [18]. A boa utilização destes materiais, cujas propriedades óticas podem ser modificadas, em superfícies envidraçadas já foi avaliada bastantes vezes e têm sido apontados bons resultados. Um cálculo intuitivo e simples, baseado na intensidade de irradiação, na modulação possível da transmissividade e o uso expectável dos edifícios, estimou que a poupança de energia anual seria de 170 kWh/m², contribuindo para a redução de consumo de energia para arrefecimento ambiente [1]. Esse valor é interessante pois é equivalente à quantidade de energia elétrica que um bom painel PV (17% de rendimento) seria capaz de produzir se tivesse a mesma orientação da janela [1]. Várias outras estimativas já foram feitas tendo em consideração não só a redução do consumo de energia no arrefecimento de espaços, mas também tendo em consideração a utilização de sistemas de ar condicionado, a luz e a satisfação dos usuários [1].

Na Figura 5, está esquematizada a mudança das propriedades óticas de uma janela S-W quando foi aplicada uma tensão. No Capítulo 2, irá ser dado mais relevo às tecnologias janelas inteligentes existentes, uma vez que estas são de fulcral importância neste trabalho.



Figura 5 - Sequência de mudança das propriedades óticas de um vidro laminado electrocromático [18].

1.5 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o impacto no consumo energético mensal e anual de um escritório inserido num edifício que a utilização de uma janela electrocromática ao invés de uma janela de vidro duplo. Para esse efeito, um modelo será desenvolvido com o *software* TRNSYS considerando várias configurações do próprio edifício, e várias estratégias de controlo das propriedades óticas da janela electrocromática. O modelo será validado através da comparação dos resultados obtidos para janela de vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade com os publicados na literatura. As simulações foram realizadas com dados climáticos de Palermo (Itália), cidade caracterizada por necessidades de energia para arrefecimento superiores às necessidades de energia para aquecimento e iluminação. Como as janelas electrocromáticas têm sempre transmissividades inferiores à transmissividade das janelas convencionais, irão ter sempre ganhos solares inferiores, aumentando as necessidades de energia para aquecimento e iluminação e diminuindo as necessidades de energia para arrefecimento, sendo por esse motivo Palermo um local favorável para a redução do consumo energético. Outro objetivo deste estudo foi o desenvolvimento e implementação de estratégias de controlo uma vez que estas têm uma influência elevada no aproveitamento energético desta tecnologia e não existir critérios de controlo bem definidos publicados na literatura até à data.

Sendo assim, o objetivo principal do trabalho é avaliar os efeitos das diferentes estratégias de controlo numa janela electrocromática quando exposta a um conjunto de condições externas de intensidade de radiação incidente e temperatura exterior diferentes. Com esse objetivo, serão analisadas 6 configurações diferentes do modelo de edifício em Palermo, tendo a janela sido colocada em planos diferentes em cada uma destas configurações. Para cada uma das configurações foram testadas 6 estratégias de controlo, exceto para uma das configurações em que apenas foram testadas 4. Para além disso, é objetivo deste trabalho provar o benefício energético no consumo de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação da utilização de janelas electrocromáticas face às janelas convencionais, assim como contribuir para a definição de estratégias de controlo mais adequadas.

1.6 Estrutura da dissertação

A dissertação está dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo, são introduzidas as motivações para o estudo do impacto energético das janelas e é feito um breve resumo à evolução das janelas utilizadas em edifícios, dando-se especial destaque às janelas de baixa emissividade e às janelas inteligentes. Por último, são explicados os objetivos da dissertação e a sua estrutura.

No segundo Capítulo, numa primeira parte são caracterizadas e classificadas as tecnologias de janelas inteligentes existentes. Na segunda parte do capítulo apresenta-se com mais detalhe as janelas electrocromáticas, dando-se destaque à sua constituição e aos novos estudos existentes.

O Capítulo 3 descreve as configurações do edifício simulado, assim como as estratégias de controlo da janela electrocromática implementadas.

O Capítulo 4 explica como foi implementado o modelo do edifício em TRNSYS, descrevendo também os passos seguidos até à versão final.

O Capítulo 5 está dividido em duas partes. Na primeira parte, o modelo é validado através dos resultados obtidos para a janela de vidro duplo e de vidro duplo de baixa emissividade comparando com resultados publicados na literatura. Na segunda parte estão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os consumos energéticos mensais e anuais nas simulações em função das configurações. Os consumos de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação são discutidos, tal como os consumos totais.

No último Capítulo encontram-se as principais conclusões obtidas com base nos resultados do trabalho realizado, e apresentar as sugestões para trabalhos de futuros.

2 Classificação das tecnologias existentes de janelas inteligentes

Neste capítulo, inicialmente irão ser definidos algumas propriedades importantes na medição do desempenho térmico e ótico das janelas inteligentes. Estas propriedades são de grande importância para compreensão da necessidade de desenvolvimento de estudos, tendo em atenção, a definição de controlo inteligentes para o uso nestas superfícies envidraçadas e quais os principais problemas. De seguida, irão ser classificadas as diferentes tecnologias existentes de janelas inteligentes. Por fim, o foco será nas tecnologias electrocromáticas existentes no mercado e nos novos estudos, uma vez que a janela inteligente que será analisada com este trabalho é uma janela electrocromática.

2.1 Propriedades importantes das janelas

A transmissividade visível (T_v) é uma propriedade que define a porção da radiação visível, que incide na superfície envidraçada, que é transmitida ao interior do espaço. O conhecimento deste parâmetro permite-nos estimar a luz um determinado espaço irá receber.

O coeficiente de ganho solar (SHGC) é um coeficiente que mede a percentagem de radiação solar difusa e direta que é transmitida diretamente por uma janela/superfície envidraçada para o espaço interior. A radiação solar absorvida pela superfície da janela e pelo resto da sua estrutura é também contabilizada por este coeficiente.

Uma maior variação da T_v e SHGC entre o estado transparente e o estado mais escuro melhor, permite à janela um intervalo de modulação superior e desse modo adaptar-se melhor às diferentes condições externas [19].

A cor das janelas e das superfícies envidraçadas é um fator importante para o conforto visual. As janelas inteligentes apresentam geralmente sempre um modo completamente transparente (sem cor) e um modo caracterizado por apresentar cor ou opacidade. Para além disso, enquanto a janela muda de estado apresenta cores intermédias, podendo-se observar, por vezes, deformidades [20]. A cor depende do espectro de refletividade que apresenta uma dada superfície. Se refletir radiação em comprimentos de onda baixos a janela terá tendência a apresentar uma cor azul/violeta. Se refletir radiação em comprimentos de onda maiores, assumirá uma cor mais avermelhada.

O tempo de transição das janelas inteligentes depende da sua temperatura, tamanho [18], espessura e direção da transição. Geralmente, quanto mais elevada for a temperatura da janela mais rápida será a mudança. Pelo contrário, quanto maior for a área e a espessura mais lenta é a mudança.

O tempo de mudança de modo deve ser curto de modo a que a janela se adapte rapidamente a mudanças nas condições externas, principalmente em dias condições externas intermédias, sendo considerado um atributo crítico no que diz respeito à proteção contra ofuscamento e melhorar o conforto dos ocupantes do espaço [21].

O número de ciclos que uma determinada janela conseguirá fazer dentro do desempenho desejado, refletindo a durabilidade ou tempo de vida da janela. Algumas janelas inteligentes quando surgiram pela primeira vez no mercado sofreram efeitos de degradação visíveis a olho nu como corrosão e dissolução [22]. A causa dos efeitos de degradação é ainda um pouco incerta. Alguns fatores foram já identificados como a entrada de vapor de água por entre as diversas camadas, a operação a temperaturas altas, a exposição à radiação UV e choques térmicos [22]. Atualmente, as empresas garantem o funcionamento dos seus produtos por 10 anos, apesar de ser expectável que os envidraçados apresentem boas propriedades durante 20 anos [18]. A durabilidade pode também ser expressa em número de ciclos, sendo desejável mais de 10^5 ciclos.

Algumas tecnologias existentes não consomem energia. No entanto, este é um parâmetro importante nas tecnologias de cristal líquido e partículas suspensas, que necessitam de energia para manter a janela num dos estados. Nas janelas electrocromáticas normalmente, o parâmetro mais importante, que está interligado com o consumo de energia, é a diferença de tensão (Volts) que é necessário para a mudança de estado.

A eficiência de Coloração (CIE) é definida pela razão entre a variação da densidade ótica e a carga necessária, de acordo com a equação:

$$\text{eficiência de coloração } \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{C}}\right) = \frac{\text{variação da densidade ótica}}{\text{unidade de carga inserida}} \quad (4)$$

Um material com um CIE elevado significa que permite uma modulação ótica num intervalo maior com necessidade de menor carga elétrica, contribuindo para um menor desgaste e consequente aumento da durabilidade [23].

2.2 Tecnologias existentes de janelas inteligentes

Várias tecnologias de janelas inteligentes têm sido desenvolvidas, havendo uma grande variedade de tecnologias disponíveis no mercado. Entre as tecnologias emergentes destacam-se os materiais cromáticos, os cristais líquidos e as partículas suspensas. Na Tabela 5, está um pequeno resumo das principais características das diferentes tecnologias. Nas subsecções seguintes irão ser abordadas cada uma das tecnologias.

Tabela 5 – Resumo das diferentes tecnologias de janelas inteligentes

Tecnologia	Ativação	Vantagem	Desvantagem	Performance térmica	Performance ótica
FC	Luz	Ativação passiva; Reduz ofuscamento.	Não reduz ganho térmico; Mais escuro no inverno do que no verão.		Protetor UV.
TC	Calor/ Temperatura	Ativação passiva; Poupança de energia	Dificuldades de produção para grandes tamanhos; Não permite o controlo sobre a mudança de estado.	Reflete o calor por radiação.	Reflete a luz infravermelha.
ECr	Tensão/ Corrente	Poupança de energia. Controlo sobre a mudança de estado.	Gasto de energia na ativação.	Controla calor que entra por radiação.	Controla a quantidade de luz.
PDLC	Tensão	Privacidade.	Não reduz consumo de energia; Sem visibilidade para o exterior.	Elevado ganho térmico.	Transmite a luz incidente.
SPD	Corrente	Visibilidade para fora; Controlo instantâneo.	Tamanho limitado; Gastos energéticos grandes.	Permite poupar energia.	Protetor UV; Reduz transmissão de luz infravermelha.

2.2.1 Dispositivos cromáticos

Os dispositivos cromáticos utilizam materiais cromáticos cujas propriedades óticas são alteradas através de um estímulo exterior. Dentro dos materiais cromáticos podemos distinguir os sistemas passivos dos ativos [6]. Nos sistemas passivos, o processo de mudança de propriedades é ativado automaticamente em resposta a uma mudança no meio ambiente. Os sistemas ativos, por outro lado, requerem o consumo de energia externa para ativação [6, 18].

2.2.1.1 Dispositivos termocromáticos

A palavra composta “termocromático” tem origem grega: “*Thermos*” significa quente e “*Chroma*” significa cor [6]. Como o nome sugere, esta tecnologia baseia-se numa mudança reversível de cor do envidraçado em resposta a variações de temperatura do filme termocromáticos aplicado na superfície envidraçada. Uma característica destes dispositivos é, por vezes, existir histerese no seu funcionamento (muda de cor de transparente para colorido a

uma temperatura superior do que a do processo contrário)[24]. A mudança de cor da camada provoca uma mudança nas propriedades óticas do material como a refletividade, transmissividade e absortividade. A mudança de propriedades óticas é um processo passivo, ocorrendo sem que seja necessário fornecer energia. Uma característica fundamental na classificação dos filmes termocromáticos é a temperatura de transição. Esta é a temperatura em que se inicia a mudança do estado transparente para o estado opaco.

Num dispositivo termocromático, um filme fino de material termocromático, podendo ser um polímero (termoplásticos, duroplásticos, revestimentos e gels) ou um material inorgânico (VO_2 [25]), é aplicado na face exterior/interior do envidraçado como está representado na Figura 6 [26]. Na Figura 6, está esquematizado o funcionamento de uma janela termocromática. Assim, quando a temperatura do envidraçado é inferior à temperatura de transição (a), o filme é transparente apresentando menor refletividade à NIR. No entanto, quando a temperatura do envidraçado ultrapassa a temperatura de transição (b), o material termocromático muda a sua natureza aumentando a refletividade à NIR, apresentando uma menor transparência e cor. Este processo é reversível. Tipicamente, o fenómeno termocromático envolve uma mudança gradual da cor ao longo de uma gama de temperaturas [27].

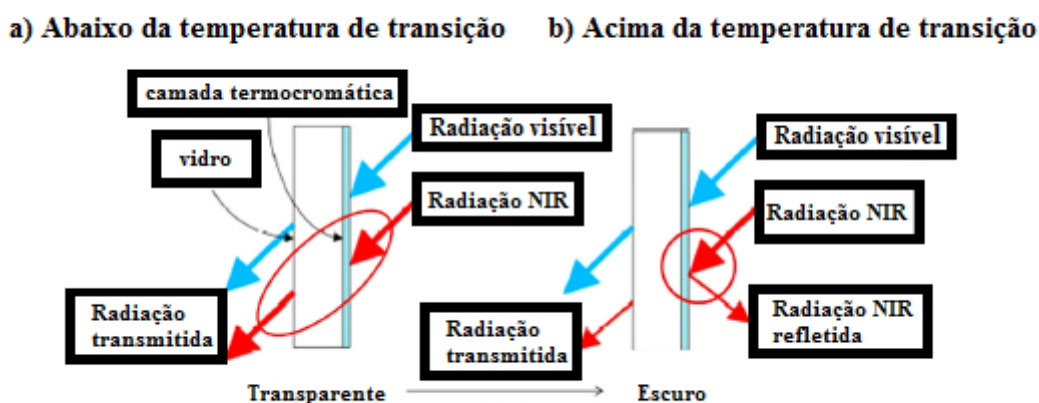


Figura 6 - Esquema representativo da resposta de um material termocromático, aplicado numa janela, à radiação, nas suas duas fases [27].

Um dos materiais termocromáticos mais utilizados é o óxido de Vanádio (que apresenta uma cor castanha/amarela [6, 28]). Embora este óxido possua uma temperatura de transição elevada, à volta de 68°C [24], quando dopado com Mg esta temperatura poderá baixar até 45°C [29]. Quanto à transmissividade à radiação, tem-se procurado materiais termocromáticos capazes de terem um desempenho como o descrito na Tabela 6. Mais sobre estes dispositivos pode ser encontrado na literatura [6, 28, 30, 31].

Tabela 6 - Desempenho ótico ideal de uma janela termocromática [[6, 32]

Estado	Transparente		Colorido	
Radiação	Visível	NIR	Visível	NIR
Transmissividade [33]	60-65	80	60-65	15
Refletividade [34]	17	12	17	17

2.2.1.2 Dispositivos fotocromáticos

As janelas fotocromáticas têm um funcionamento similar ao dos materiais termocromáticos, no sentido que ambos respondem a variações das condições do meio ambiente. Os materiais fotocromáticos são materiais que sofrem uma transformação reversível ativada pela luz (“foto”) incidente no envidraçado. O filme fotocromático assume o estado transparente quando sobre ele não incide suficiente radiação solar. Ao incidir sobre o filme fotocromático certos tipos de radiação (normalmente UV [35]) com intensidade suficiente, este escurece, sofrendo alterações no espectro de transmissividade.

O fotocromismo foi encontrado em materiais poliméricos como o *Polymethyl methacrylate* (PMMA) [35-37] dopados com *Spirooxazine*, *Spiropyrans* ou *Naphthopyrans* e em materiais inorgânicos como o cloreto de prata (AgCl) e o brometo de prata (AgBr) [35, 38]. Embora estes materiais e estas tecnologias possam ser utilizados em superfícies envidraçadas, o seu maior desenvolvimento foi na indústria de óculos de sol e automóvel. Isto aconteceu, visto que os materiais que capazes sofrem uma grande diminuição da transmissividade da radiação UV, o que é bastante vantajoso nestas aplicações, protegendo os olhos da radiação UV e evitando ofuscamento. A sua aplicação em janelas é pequena uma vez que embora reduza o ofuscamento, o seu desempenho térmico nem sempre é benéfico, podendo estar no modo transparente quando é necessário arrefecer, mudando para o modo escuro quando é necessário aquecer [6]. Mais informação sobre os dispositivos fotocromáticos pode ser encontrada na literatura [34, 37, 39, 40].

2.2.1.3 Dispositivos electrocromáticos

O eletrocromismo em filmes finos de óxidos metálicos foi descoberto em trabalhos independentes [1]. As mudanças de cor dos óxidos de tungsténio imerso em ácido sulfúrico induzidas eletricamente foram descritas num documento interno em Balzers AG no Liechtenstein em 1953 [1]. As pesquisas sobre este fenómeno e os primeiros estudos feitos pelos EUA, pela União Soviética, Japão e Europa foram motivados para aplicação em placas de informação [1]. Para além desta aplicação, também surgiu interesse de utilizar estes materiais em vidros retrovisores. Apenas alguns anos mais tarde, se percebeu que estes materiais podem ter uma importância grande para aumentar a eficiência dos envidraçados em edifícios [1]. O eletrocromismo é a propriedade que um material tem de mudar as suas propriedades óticas reversivelmente quando um potencial externo é aplicado, associado com a processos de inserção e extração de iões [18]. Esta tecnologia apresenta bastantes vantagens relativamente aos dispositivos termocromáticos e fotocromáticos, uma vez que permite escolher quando se dá a mudança de estado, ou seja, permite o desenvolvimento de algoritmos para o controlo. O material mais utilizado em janelas electrocromáticas é WO₃ que apresenta uma cor azul no estado escuro.

Atualmente, a transmissividade visível apresentada pelos dispositivos electrocromáticos varia entre 0,15 e 0,035 para o estado escuro e cerca de 0,6 para estado transparente [18]. Quanto ao coeficiente de ganho solar os valores andam, geralmente, à volta de 0,09 para o estado escuro e 0,48 para o estado transparente [18]. Os aparelhos electrocromáticos necessitam de energia elétrica apenas para mudar de estado, geralmente 5 V, sendo apesar disso considerados dispositivos ativos. Na Tabela 7, encontra-se a informação recolhida na literatura à cerca de alguns dispositivos electrocromáticos já disponíveis no mercado.

Tabela 7 - Informação relativa à área máxima, coeficiente global de transferência de calor, intervalo de modulação e número de ciclos garantidos de algumas janelas electrocromáticas comerciais [18]

Fabricante	Área (cm ²)	U (W/m ² K)	T _{sol}	T _v	g-Value	Número de ciclos
Sage Electrochromics, Inc (WO ₃)	108x150	1,65	0,40-0,015	0,62-0,035	0,48-0,09	10 ⁵
EControl-Glas GmbH and Co. KG (WO ₃)	120 x 220	1,1	0,50-0,15		0,36-0,12	Garantia de 10 anos
		0,5	0,45-0,14		0,30-0,10	
Gesimat GmbH (WO ₃ and CE)	80 x 120		0,52-0,06	0,75-0,08		Garantia de 10 anos

O presente trabalho irá concentrar-se na avaliação energética da aplicação de dispositivos electrocromáticos, desse modo, as tecnologias existentes e ainda na fase de estudo serão mais aprofundadas na secção 2.3.

2.2.1.4 Dispositivo gasocromático

As janelas gasocromáticas baseiam-se num conceito similar ao das janelas electrocromáticas. A principal diferença é a utilização de hidrogénio (H₂) ao invés de uma tensão para ativar a transformação do estado transparente para o estado escuro num filme electrocromático[18]. O hidrogénio é introduzido diluído (< 3% - limite de combustão) numa cavidade que se encontra isolada por vidro e onde entram em contacto com o filme de tungsténio. A exposição a oxigénio faz com que o filme electrocromático volte ao estado transparente. Na Figura 7, está representado um esquema de um dispositivo gasocromático.

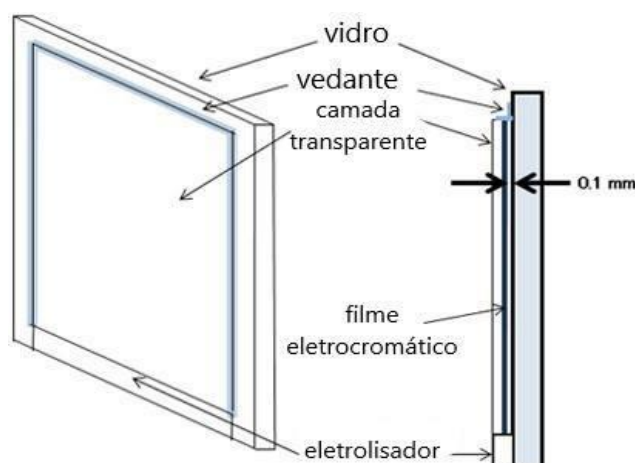


Figura 7 - Esquema de janela gasocromática [41].

Em comparação com os materiais electrocromáticos, estes são mais baratos e mais simples, uma vez que apenas necessitam de um camada electrocromática com catalisador Pd, não sendo necessário as camadas de condutores e armazenadores de iões, como pode ser visto na Figura 7 [6]. No entanto, exigem um controlo atento e rigoroso do processo de troca de gás, devendo a cavidade hermeticamente selada [6]. Os dispositivos gasocromáticos demonstram uma boa modulação da transmissividade (permite um intervalo maior de transmissividade), necessitam de menor quantidade de energia para funcionarem e apresentam uma maior

facilidade de funcionar num estado intermédio entre transparente e opaco. No entanto, nem todos os materiais electrocromáticos podem ser escurecidos por hidrogénio. Na Tabela 8, encontra-se a informação recolhida na literatura à cerca de alguns dispositivos gasocromáticos. Mais informação sobre os dispositivos gasocromáticos pode ser encontrada na literatura [18, 42-46].

Tabela 8 – Informação geral à cerca de alguns dispositivos gasocromáticos como a área, intervalo de modulação da transmissividade ou refletividade, número de ciclos expectável e tempo de resposta a colorar e a descolorar [18]

Configuração do envidraçado	Tamanho (cm ²)	Transmissividade		Ciclos	Tempo de resposta (s)
G WO ₃ Pt H ₂ Ar G [47]	6600	T _v : 0,77-0,06	T _{sol} : 0,76-0,05	20000	20
G H ₂ /Ar Pd ZrO ₂ MnNiMg ITO G [48]		R _{sol} 0,80 – 0,15		1000	
G/P Pd:W PTA Pt H ₂ [49]		T _v 0,74 – 0,09			50/120
G/P Pd: W-PTA/ICS-PPG Pt H ₂		T _v 0,86-0,05			~200
G/P Pt: WO ₃ Pt H ₂		T _v 0,64-0,09			500/1000

*G=vidro, P=polímero.

2.2.2 Dispositivo de cristais líquido disperso

A tecnologia de cristal líquido disperso permite uma abordagem diferente. Atualmente, para aplicações em janelas e envidraçados os tipos de dispositivos de cristal líquido disperso mais utilizados são os polímeros de cristal líquido disperso (PDLC) e os *Nematic curvilinear aligned phase* (NCAP) [50]. Esta tecnologia está a atrair interesse, principalmente na proteção da privacidade no interior de casas como em casas de banho, vestiários de lojas e salas de conferência [18]. Os dispositivos são compostos por uma camada de cristal líquido mantido entre duas camadas de um condutor líquido, que por sua vez se encontra pressionado por duas camadas de vidro. Normalmente, as moléculas de cristal líquido estão posicionadas ao acaso e em orientações desalinhadas, dispersando a luz incidente e ocultando desse modo a vista para dentro de um espaço, como pode ser visto na Figura 8 [6]. Quando é ligada a corrente nas duas camadas condutoras, um campo elétrico é criado através de elétrodos (condutor líquido na Figura 8). Esse campo elétrico faz com que as moléculas se alinhem na mesma direção modificando a transmissividade da camada (aumenta a transparência). A modulação é rápida, o tempo de resposta é muito curto. No entanto, manter no estado transparente obriga a grandes gastos de energia, consumindo cerca de 5 a 20 W/m² [18]. Para além disso, os PDLC apresentam fraca estabilidade quando expostos à radiação UV [18]. Embora esta tecnologia seja interessante para um grande número de aplicações, sendo por esse fato já bastante utilizada, quando aplicada a janelas necessita de mais desenvolvimento. Isto porque, atualmente, não permite reduzir os ganhos solares de modo significativo, sendo por isso uma melhor solução para envidraçados interiores. Na verdade, estas janelas permitem um intervalo de modulação médio de apenas 0,02 [18]. Mais informação sobre esta tecnologia está disponível na literatura [18, 50, 51].

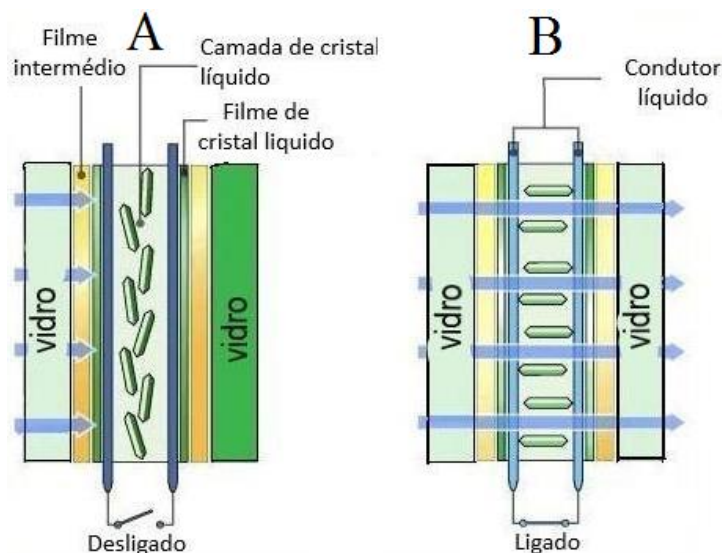


Figura 8 - Esquema de janela de cristal líquido disperso: A – modo opaco (corrente desligada), B – modo transparente (corrente ligada) [52].

2.2.3 Dispositivo de partículas suspensas (SPD)

As janelas com partículas suspensas têm em comum com a tecnologia de cristal líquido uma modulação bastante rápida (tempo de resposta de 100 - 200 ms), consomem bastante energia (65 – 220 V AC) na fase transparente e necessitam de alimentação elétrica entre 1,9 e 16 W/m² [18]. Os dispositivos de partículas suspensas consistem numa camada líquida ativa formada por dipolos adsorventes ou partículas esféricas. Esta camada pode ser, por exemplo, *polyhalide* suspenso num fluido orgânico ou gel [18]. A camada ativa é colocada entre dois filmes condutores transparentes, como mostra na Figura 9. Geralmente, o dispositivo está na fase escura/opaca quando o campo elétrico não está aplicado, uma vez que as partículas se encontram desordenadas, impedindo a passagem da luz. Quando o campo elétrico é aplicado, as partículas alinham-se o que resulta num estado de boa transmissividade. Os dispositivos de partículas suspensas permitem modular a transmissividade entre 0,79-0,49 e 0,50-0,04 [18]. Devido às patentes existentes na tecnologia [53], há pouca informação na literatura sobre novos desenvolvimentos na tecnologia SPD.

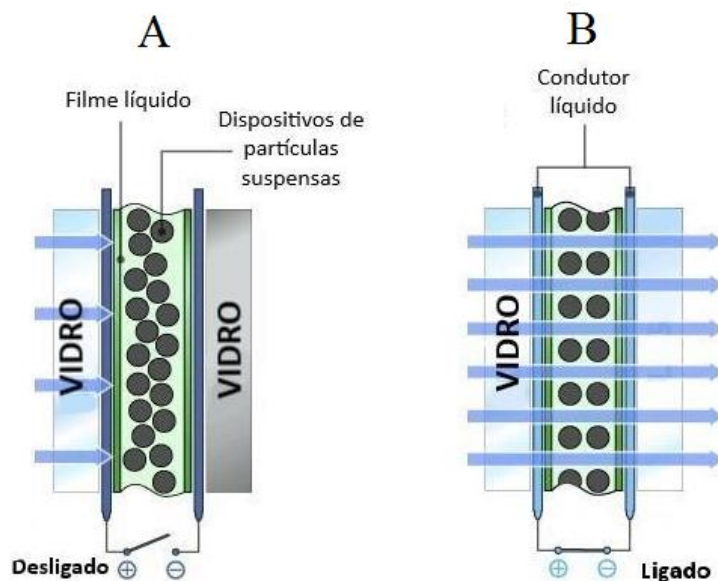


Figura 9 - Esquema de envidraçado baseado na tecnologia de Partículas Suspensas (A – Estado opaco (desligado), B – Estado transparente (ligado) [54].

2.3 Composição e comportamento de envidraçados electrocromático

Um dispositivo electrocromático genérico, com cinco camadas impostas entre um substrato transparente (vidro), está representado na Figura 10. Existem três diferentes tipos de materiais em camadas diferentes: o eletrólito (4), os filmes electrocromáticos (3 e 5) e os condutores transparentes (2) [1]. O eletrólito é uma camada condutor de iões que separa os dois filmes electrocromáticos. Os filmes electrocromáticos têm a capacidade de conduzir iões e eletrões, sendo, portanto, condutores mistos [1]. Os condutores transparentes por sua vez são condutores de eletrões [1]. A transformação ótica ocorre quando os eletrões se movem do condutor transparente para o filme electrocromático. Este processo desencadeia também o transporte de iões através do eletrólito para o filme electrocromático, de modo a equilibra-lo. Os princípios de operação podem ser vistos como os de um pequeno filme de bateria elétrica, em que o estado em que a bateria estaria a carregar se traduz no estado em que as propriedades óticas do material se modificam.

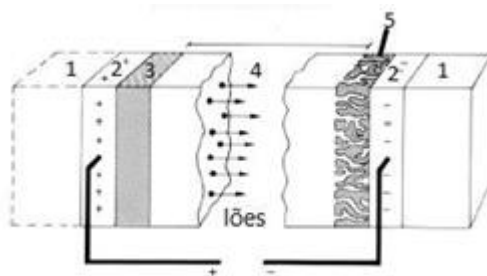


Figura 10 - Esquema de um dispositivo electrocromático (1-vidro; 2-condutor transparente; 3- Filme electrocromático/Armazenador de iões; 4- Eletrólito; 5- Filme electrocromático).

2.3.1 Condutores transparentes de dispositivos electrocromáticos

Os condutores transparentes são materiais que possuem uma alta condutividade eletrónica, de modo a permitir uma tensão baixa ao longo da superfície condutora [1]. Outra característica que estes materiais necessitam é uma grande transmitância para permitir uma passagem de

luminosidade [1]. Devido à necessidade de materiais que apresentem um desempenho muito alto quanto à transparência e condutividade eletrónica, estes constituem a parte mais cara dum instrumento electrocromático [1]. Os condutores transparentes são componentes importantes não apenas quando aplicados a janelas inteligentes, mas são também utilizados noutras aplicações como por exemplo, em células solares e em instrumentos de emissão de luz [1].

Os mais comuns condutores transparentes são os filmes semicondutores, os filmes metálicos e os nano-fios [1]. Os filmes semicondutores incluem materiais como o óxido de índio dopado com estanho (ITO), o óxido de zinco dopado com alumínio (AZO) e o óxido de zinco dopado com gálio (GZO). Estes são materiais que podem ser fabricados em larga escala através do adequado controlo do processo de deposição física de vapor em vidro ou polietileno tereftalato (PET), conseguindo-se resistividades de $\sim 2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, para o vidro, e $\sim 4 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, para o PET. São todos transparentes ao longo de grande parte do espectro de radiação solar. Para além disso, o seu funcionamento é bem compreendido, o que permite o desenvolvimento de modelos e simulações precisas das suas propriedades óticas. Os filmes ITO são os mais utilizados, mas têm custos mais elevados devido ao preço alto do índio [1]. Outra desvantagem dos filmes ITO é a criação de uma barreira elétrica entre estes e os óxidos de tungsténio que são bastante utilizados como filmes electrocromáticos [55].

Para ultrapassar este problema tem-se desenvolvido os filmes metálicos, contribuindo para um melhor desempenho dos aparelhos electrocromáticos e evitando a necessidade de ativação eletrónica [1]. Os metais como o cobre, prata e ouro tem condutividades elétricas elevadas, em comparação com os semicondutores. Para a espessura do filme estes metais apresentam propriedades elétricas similares e consegue-se obter uma absorptividade de luz inferior a 10% [1]. O isolamento com prata é já utilizado extensivamente na fenestração, e é possível construir estruturas cuja transmissividade luminosa é de cerca de 80%, sendo a transmissividade solar baixa [1].

Em último lugar os nanotubos em carbono podem apresentar propriedades semelhantes às dos metais ou a semicondutores [1]. O grafeno é caracterizado por uma transmissividade ótica de 90% e resistência elétrica de 30Ω [1]. Os nano-fios metálicos possuem uma resistência entre 15Ω a 100Ω [1].

A comparação direta entre os diferentes tipos de condutores transparentes é difícil e deve-se ter em consideração um conjunto de fatores como o preço, a condutividade elétrica, a transmissividade ótica, assim como, a durabilidade, as propriedades mecânicas e o brilho [1]. A Figura 11 apresenta uma compilação de informação sobre a condutividade elétrica e a respetiva transmissividade ótica para um comprimento de onda de 550 nm.

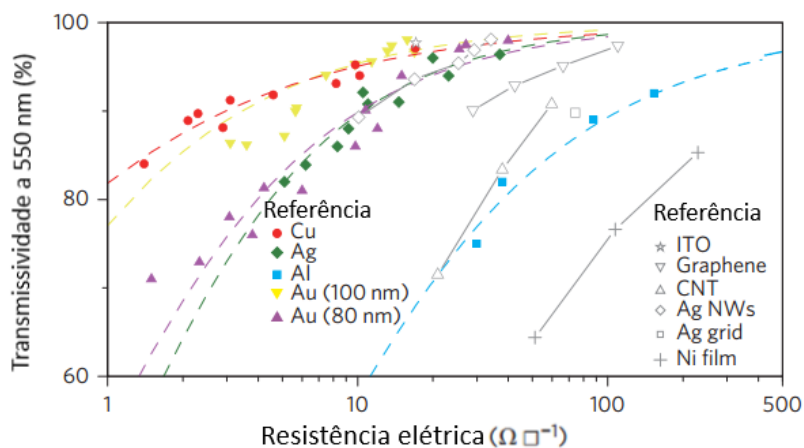


Figura 11 - Valores de transmissividade para comprimento de onda de 550 nm em função da resistência elétrica para vários condutores transparentes [56].

Uma vez que para janelas electrocromáticas são considerados valores para resistências elétricas entre 10 e 20 Ω , conclui-se que aqueles que permitem melhor transmissividade são o ITO e os metais como Au, Ag e Cu [1].

2.4 Camada eletrólito/condutor iónico de dispositivos electrocromáticos

O eletrólito (Figura 10) é um elemento importante em janelas inteligentes, uma vez que tem como função a condução de iões para o filme electrocromático, sendo também isolador eletrónico [57, 58]. Como tal, é necessário que este possua uma elevada condutividade iónica de modo a que a resposta seja suficientemente rápida [59]. Para além disso, quando o aparelho está desligado este funciona como isolador [57]. A condução é mais fácil para iões leves como os protões (H^+) ou iões de lítio (Li^+), sendo por isso os mais utilizados em dispositivos electrocromáticos [1]. De acordo com a literatura, os sais que permitem obter uma condutividade mais elevada são os que libertam iões de lítio como o $LiClO_4$ e o $LiBF_4$ [60]. Existem três tipos de eletrólitos: os filmes finos sólidos; os polímeros; e os líquidos iónicos. Os polímeros e líquidos iónicos permitem construções mais robustas do que as que são possíveis com filmes finos sólidos. Os eletrólitos líquidos transparentes e filmes de óxidos contendo iões começaram por ser usados nos primeiros estudos. Entretanto, a partir de 1980 os eletrólitos poliméricos começaram a ganhar bastante interesse [1]. Recentemente, vários estudos têm abordado os benefícios da adição de nano partículas. Um trabalho recente explorou a possibilidade de utilizar um eletrólito que consistia em polietilenoimina-litíio bis (trifluorometilsulfonil) ($PEI-LiTFSI$) [61]. A adição de nano partículas resultou na obtenção de absorção na região NIR sem diminuir a transmissividade luminosa significativamente [1], uma característica que é particularmente interessante em regiões de clima quente.

2.5 Filmes electrocromáticos

O filme electrocromático (elementos 3 e 5 na Figura 10) é responsável pela variabilidade na transmissividade, sofrendo alterações entre o estado oxidado e reduzido [18]. Idealmente, os materiais electrocromáticos devem também ser refletores no estado colorido, ao invés de absorverem a radiação. No entanto, a maioria dos materiais electrocromáticos conhecidos são bons absorsores no seu estado colorido.

H																			He					
Li	Be																		B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg																		Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe							
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
Fr	Ra	Ac																						

Óxido catódico

Óxido anódico

Figura 12 - Tabela periódica com caracterização dos elementos em: suscetíveis de formar óxidos catódicos, óxidos anódicos, ambos ou nenhum [1].

Existem dois tipos principais de óxidos metálicos electrocromáticos: os óxidos catódicos, que coloram quando há inserção de iões, e os óxidos anódicos que coloram quando há extração de iões (ver Figura 12).

Os óxidos anódicos mais utilizados são os óxidos de irídio e os óxidos de níquel. Devido ao custo elevado do irídio, este não tem muito interesse em termos comerciais, mesmo quando diluído com tântalo ou estanho [1]. Os valores típicos para a eficiência de coloração do NiO_x

encontram-se entre 30 e 50 cm²/C. Os óxidos de níquel funcionam bem com os óxidos de tungsténio (óxido catódico) em termos do balanço da carga no aparelho [23]. Para além disso, a coloração que os óxidos de níquel produzem é complementar à coloração do óxido de tungsténio apresentando-se com um estado escuro mais neutro, melhorando a aparência visual [23]. A adição de dopantes como o tungsténio, o tântalo, o alumínio e o magnésio melhora o funcionamento do envidraçado, melhorando propriedades como a densidade da transferência de carga (quanto mais denso, mais rápida é a mudança), resposta ótica, durabilidade, eficiência da coloração e transmissividade luminosa. Na Figura 13, está representado o espectro da eficiência da coloração para o LiNiO_x e para o filme com aditivos Li_{1,2}NiW_{0,1}O_x. Como pode ser observado, o filme com aditivos tem uma eficiência de coloração mais alta para pequenos comprimentos de onda (até 550 nm).

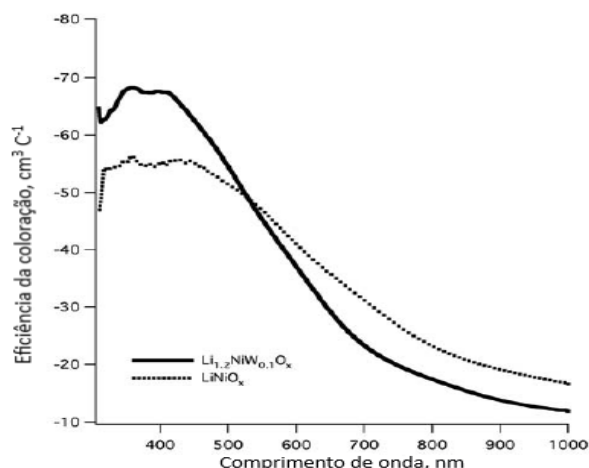
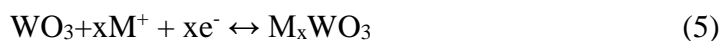


Figura 13 - Eficiência de coloração do óxido de Níquel [23].

Dentro dos óxidos catódicos, o óxido de tungsténio é o mais estudado para filmes electrocromáticos [1]. A reação electrocromática que origina a resposta cromática do óxido de tungsténio pode ser descrita através da injeção de uma quantidade x de iões positivos (M^+) e a igual quantidade de eletrões (e^-):



Como já foi mencionado os iões (M^+) mais utilizados são os iões Li^+ e H^+ . O óxido de tungsténio amorfo sub-estequiométrico é o que apresenta uma eficiência na coloração maior na região visível, tipicamente maior que 50 cm²/C, apresentando também uma resposta mais rápida e uma maior durabilidade [23]. Nestes óxidos, a grande mudança na absorção ótica é atribuída à absorção por parte de *polarons* [1, 23]. Um *polaron* é uma quasipartícula que surge devido aos catiões se ligarem com o oxigénio da rede, criando um espaço de separação para com os eletrões. À absorção de radiação por parte do *polarons* dá-se o nome de absorção localizada de ressonância plasmónica (LSPR). LSPR é um fenómeno que tem atraído bastante atenção e interesse, tendo muitas investigações sido feitas em metais nobres, uma vez que estes têm uma enorme estabilidade e uma densidade de carga elevada.

Contrariamente, nos óxidos de tungsténio cristalino, o fenómeno LSPR não ocorre, sendo que os eletrões livres entram na estrutura do WO_3 . Isto torna o material mais metálico com um pequeno aumento da absorção ao longo do espectro e um pequeno aumento da refletividade da radiação infravermelha. Os óxidos de tungsténio cristalino têm um menor grau de coloração quando comparado com os óxidos de tungsténio amorfos. A taxa e intensidade da mudança de cor no WO_3 depende da disponibilidade de eletrões para a reação reversível

$W^{6+} \leftrightarrow W^{5+}$ [62]. Apesar dos catiões terem a função única de equilibrar a carga, é a dinâmica do seu transporte que determina a cinética da reação reversível [62]. Por esse motivo, o interesse no aumento do coeficiente de difusão dos catiões no filme electrocromático é grande, uma vez que contribui com um grande peso na velocidade de mudança de estado, assim como no tempo de resposta ao impulso do potencial elétrico [62]. No sentido de melhorar o desempenho do óxido de tungsténio, é também possível utilizar óxidos de uma mistura de tungsténio com outros elementos [1]. Por exemplo, o óxido de tungsténio-titânio permite uma maior durabilidade ao ciclo electrocromático, uma vez que o titânio estabiliza a estrutura do óxido [1]. Outros óxidos já estudados são: W-Li, W-C, W-N, W-V, W-Ni, W-Nb, W-Mo, etc. [1].

O LSPR foi, também, observado em nano cristais de semicondutores altamente dopados, como o ITO [1, 63-66]. A presença de nano partículas de ITO permite melhorar a dispersão das partículas de tungsténio expondo uma grande área para intercalação com Li^+ [62]. O efeito da adição de ITO permite aumentar a condutividade eletrónica [62]. Na Figura 14, podemos observar a intensidade de corrente em função da tensão aplicada para óxidos de tungsténio com diferentes percentagens de ITO. Como pode ser observado, quanto maior é a percentagem de ITO nos filmes compósitos, menor é a tensão necessária para a mudança de estado, uma vez que a resistência elétrica diminui. O aumento na condutividade eletrónica tem um efeito significativo nas dinâmicas da difusão dos iões Li^+ no filme de óxidos de tungsténio[62], como pode ser observado na Figura 15. No entanto, este aumento da condutividade eletrónica apenas acontece até 15% da fração mássica de ITO.

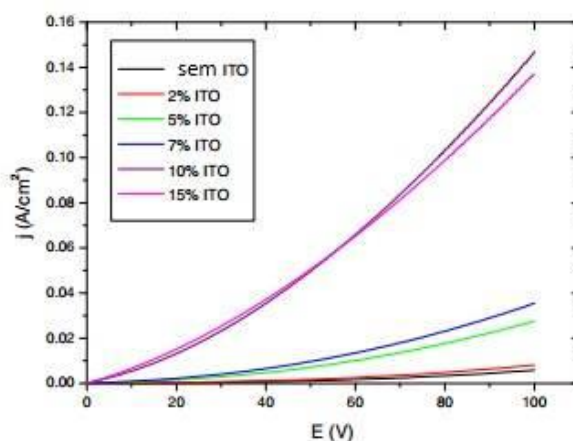


Figura 14 - Corrente em função da tensão para filmes compósitos $WO_3 \cdot H_2O$, 10 wt % PVDF, e 0-15% nano ITO [62].

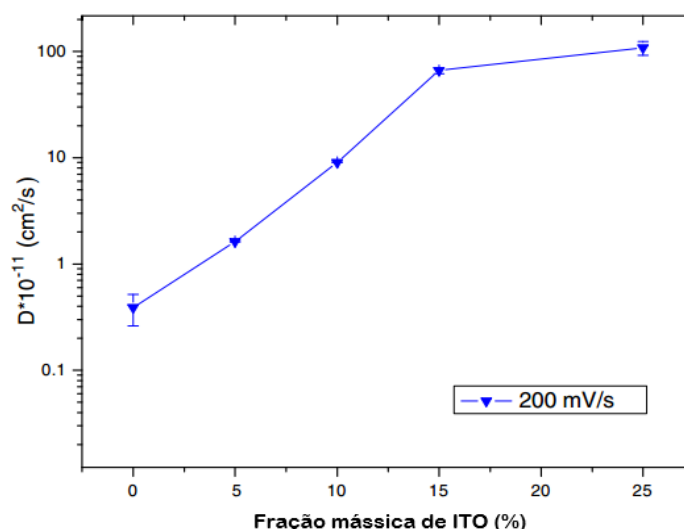


Figura 15 - Coeficiente de difusão de íons em função da percentagem de ITO [62].

Contrariamente aos outros materiais electrocromáticos que modulam basicamente a radiação visível, os nano cristais de ITO oferecem uma oportunidade de controlar a transmissão de radiação NIR sem afetar significativamente a transmissão de radiação visível [64, 66]. Isto é um comportamento interessante, uma vez que possibilita a redução de radiação térmica correspondentes à radiação NIR, permitindo uma boa luminosidade. Na Figura 16, está representado a transmissividade de filmes finos de nano cristais de ITO (13,1% de Sn) e AZO (3,7% de Al) para uma gama de comprimentos de onda entre 400-2200 nm. Considerando o facto de que a porção de radiação NIR que o sol emite é mais intensa para comprimentos de onda pequenos (700-1300 nm), os nano cristais de ITO e AZO não são uma boa solução para modular a quantidade de energia solar a transmitir [64]. No entanto, estes abriram caminho para novos estudos na procura de nano cristais que permitam uma boa modulação no intervalo de comprimento de onda entre 700 e 1300 nm [64]. Uma boa modulação neste intervalo de comprimento de onda permitiria uma redução da transmissão NIR, sem impedir uma boa visibilidade para fora do espaço, que como foi dito no capítulo anterior, é muito importante para garantir o conforto visual. Como a radiação NIR constitui uma parte significativa da radiação térmica, a diminuição da sua transmissividade permitirá um modo na janela electrocromática em que entra uma menor quantidade de calor e em que a luminosidade, assim como a visão para o exterior não seriam afetadas.

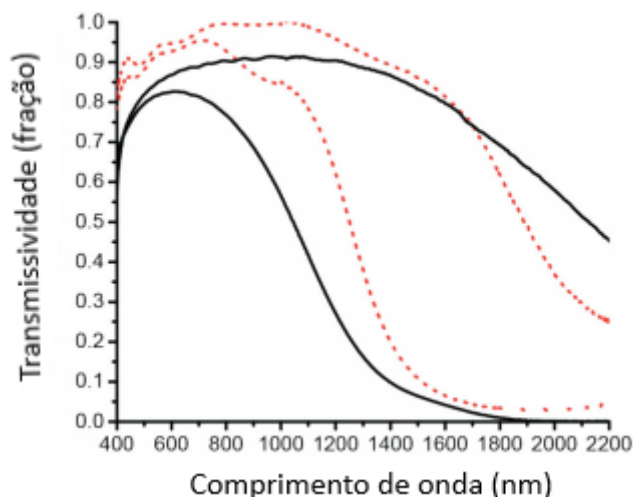


Figura 16 - Transmissividade no estado transparente (4V) e colorido (1,5V - AZO e 2V - ITO) para filmes de nano cristais de AZO (preto) e ITO (vermelho) com espessura de 2435 ± 30 nm e 316 ± 10 nm e diâmetro dos nano cristais de $9,0 \pm 1,5$ nm e $5,0 \pm 1,0$ nm respetivamente [66].

Os nano cristais de óxido de tungsténio intersticialmente dopado e com vagas de oxigénio conseguem exibir LSPR em comprimentos de onda menores do que os nano cristais de ITO e AZO [64, 67]. Na Figura 17, está representado o espectro de absorção de vários filmes de nano cristais de WO_{3-x} colocado entre vidro revestido com ITO. As linhas azuis dizem respeito a um filme mesoporoso a níveis de tensão diferentes. A linha preta representa o espectro de um filme com uma estrutura desordenada com o mesmo volume que os nano cristais de WO_{3-x} . Alternativamente, tem-se estudado a viabilidade de óxidos de tungsténio contendo nano partículas, que são capazes de induzir LSPR na região visível, como Ag, Pt e Au [1].

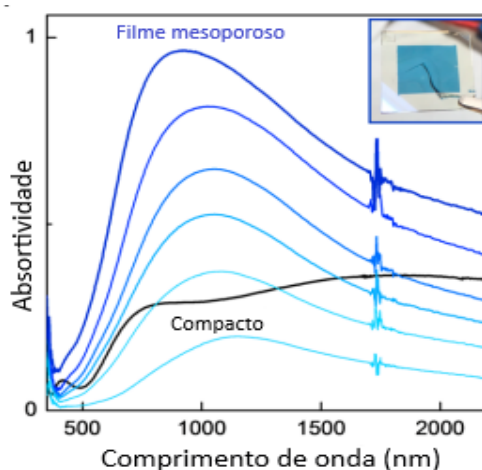


Figura 17 - Espectro de absorção ótica para um filme de nano cristais de WO_{3-x} [64].

Outros óxidos como o óxido de titânio, o óxido de molibdénio e o óxido de nióbio também têm sido bastante estudados [1]. O óxido de nióbio (NbO_x) tem propriedades interessantes para aplicação em dispositivos electrocromáticos. Quando o NbO_x é carregado electrocromaticamente, tal como no óxido de tungsténio amorfo subestequiométrico, há o aparecimento de *polarons* [64]. Estes provocam um aumento da absorção de radiação, principalmente para comprimento de ondas pequenos na região da radiação visível (LSPR na zona visível), dando origem a um filme com uma cor castanha [64]. Na Figura 18, está

representado o espectro do óxido de nióbio preparado por deposição pulverizada (MG) e por sol-gel (SG) [68].

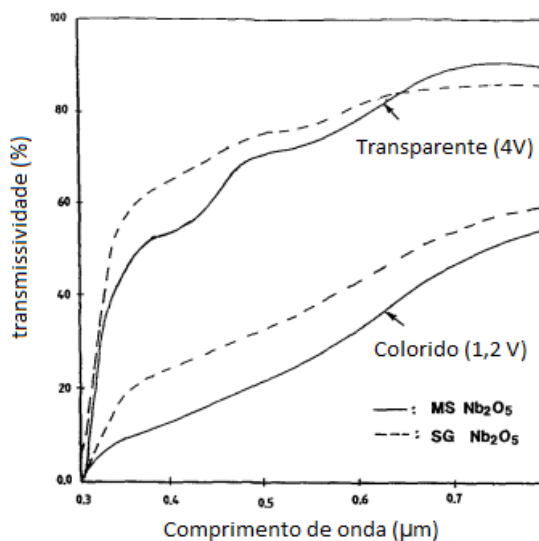


Figura 18 - Espectro da transmissividade de filmes óxido de nióbio produzido por MS e SG: transparente a 4V e colorido a 1,2 V [68].

A reação electrocromática pode ser representada da seguinte forma:



A cor no estado colorido depende da cristalinidade do filme electrocromático, que apresenta uma cor castanha para estruturas amorfas, uma cor cinzenta para cristais com diâmetros menores que 25 nm e uma cor azul para cristais com diâmetros maiores que 30 nm [69]. A grande desvantagem dos óxidos de nióbio quando comparados com os óxidos de tungsténio é a sua baixa eficiência de coloração entre 12-27 cm²/C [18].

Como foi apresentado na discussão precedente existe uma variedade relativamente grande de opções a tomar no desenvolvimento de uma janela electrocromáticas. Apesar disso, é possível ainda combinar diferentes tipos de materiais electrocromáticos, filmes armazenadores de iões e condutores de iões com o objetivo de melhorar o intervalo de modulação, durabilidade e velocidade de mudança de estado [18]. Por exemplo, o nano compósito de nano cristais de óxido de tungsténio dopado com vagas de oxigénio (WO_{3-x}) e óxido de nióbio amorfo quando colocados numa estrutura mesoporosa [64], combinam uma boa modulação na região do visível do óxido de nióbio com uma boa modulação da radiação NIR, por parte do óxido WO_{3-x}, permitindo 3 modos de operação do aparelho electrocromático. A Figura 19 esquematiza esses 3 modos de funcionamento. A inovação deste material é a oferta de um modo intermédio (2 na Figura 19) em que permite a entrada de luz solar, bloqueando a radiação NIR, contribuindo assim para a diminuição da carga térmica, mantendo uma boa luminosidade solar e visão para o exterior. O terceiro modo, poder-se-ia utilizar quando o espaço não está a ser ocupado ou quando a radiação incide diretamente na janela (causando ofuscamento), uma vez que a transmissão quer de radiação visível quer de NIR é reduzida. Na Figura 20, estão representadas algumas características deste material (espectro solar, tensão aplicada em cada modo, durabilidade). Como podemos ver ao analisar a Figura 20-a, quando aplicado 4 V nos eléctrodos, o filme fica no seu estado transparente à NIR e à radiação visível, uma vez que ambos os óxidos se encontram descarregados. Quando a tensão aplicada é 2,3 V

os nano-cristais de WO_{3-x} são carregados seletivamente, dando origem à absorção LSPR no intervalo de radiação NIR, reduzindo o ganho solar e mantendo uma boa transmissividade de radiação visível. Ao aplicar 1,5 V, o NbO_x é reduzido por iões Li^+ , sendo induzida absorção LSPR no intervalo de radiação visível. O WO_{3-x} também aumenta a sua absorção de NIR e radiação visível.

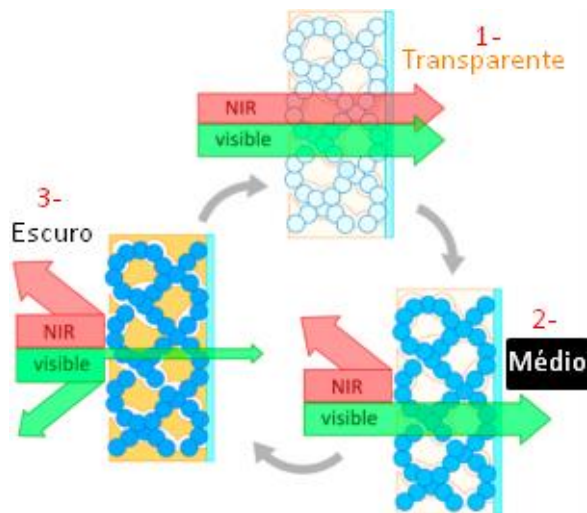


Figura 19 - Modos de operação de filme de nanocompósito (nano cristais de WO_{3-x} e NbO_x).

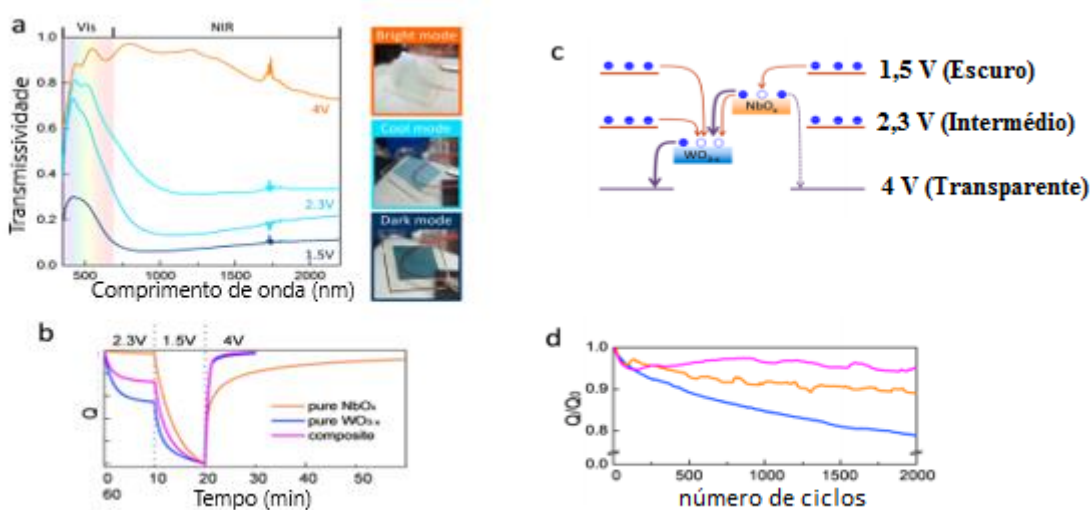


Figura 20 - (a) Espectro da transmissividade do filme nanocompósito de 260nm $\text{WO}_{3-x}\text{-NbO}_x$ num vidro revestido com ITO. (b) Perfil normalizado de carga seguindo os passos potencioestáticos para 3 filmes diferentes. (c) Diagrama de energia esquemático mostrando o movimento de carga no compósito. (d) Perfil normalizado de carga para os mesmos 3 filmes depois de 2000 ciclos.

3 Desenvolvimento do modelo de simulação e estratégias de controlo

O papel deste capítulo será descrever o edifício a simular. Esta descrição incluirá o volume, a estrutura das paredes e janelas (constituição, área, orientação, inclinação, propriedades térmicas), a sua localização e as condições climáticas do meio ambiente. Também, será dada a definição detalhada das propriedades termofísicas da envolvente do edifício, necessárias para elaborar o estudo energético do mesmo. Serão também apresentadas informações relativas à ocupação que irá contribuir para os ganhos interno.

Uma parte importante deste capítulo é a apresentação das diferentes estratégias de controlo da modulação da janela electrocromática que serão implementadas no modelo com o objetivo de estudar qual o melhor critério para reduzir os consumos energéticos do modelo.

3.1 Descrição do edifício

De modo, a validar o modelo com os estudos de Allen et al. [5], foi considerado um edifício localizado em Palermo, no sul de Itália, com uma latitude de 38,12°N e uma longitude de 13,37°. Este edifício irá estar sujeito, portanto, a um clima caracterizado por verões quentes e invernos frios e chuvosos, tendo sido utilizado um ficheiro com uma meteorologia próxima da do local, através do *Meteonorm* [70], com uma temperatura média no Inverno de 13°C, e de 25,2°C no verão, o que leva a que a temperatura média anual seja de 18,6°C. Em comparação com o Porto que tem uma temperatura média anual de 14,5°C, Palermo tem uma temperatura média no verão mais elevada (19,6°C), tendo dessa forma períodos mais longos de necessidade de redução de ganhos solares.

Como no estudo de Allen et al. [5], foi escolhido um escritório com as dimensões 5 x 4 x 3 para a simulação. O espaço foi considerado pertencer a um edifício mais largo, tendo apenas uma parede com a orientação para Sul e o telhado expostos às condições externas. As restantes superfícies exteriores foram consideradas adiabáticas, não havendo por isso trocas de calor. Por isso, definiram-se apenas 3 tipos de paredes diferentes: parede exterior, telhado e parede interior. Na Figura 21, estão representadas as 6 configurações diferentes considerados como adequados para o edifício estudado. Para todas as configurações admitiram-se uma área de telhado e chão de 20 m² e uma janela com as dimensões de 2x1,5, representando uma razão de área de janela/parede de 25%, quando inserida na parede externa, e de 6,67% quando inserida no telhado. As inclinações do plano da janela usadas foram de 90°, Figura 21a, de 60°, Figura 21b, de 30°, Figura 21c, e de 0°, Figura 21d, com orientação para Sul. Para o caso do plano com inclinação de 90°, foi também simulado com a orientação da janela para oeste, Figura 21e, e este, Figura 21f, tendo para isso rodado o edifício, ficando a respetiva parede com a janela sujeita às condições externas. De modo a fechar o espaço, nos casos em que a inclinação do telhado é de 30° e 60°, foram acrescentadas paredes em que a superfície exterior é também adiabática. O volume do espaço nestes dois casos será maior do que no caso a), o que será tido em consideração, no tratamento dos resultados.

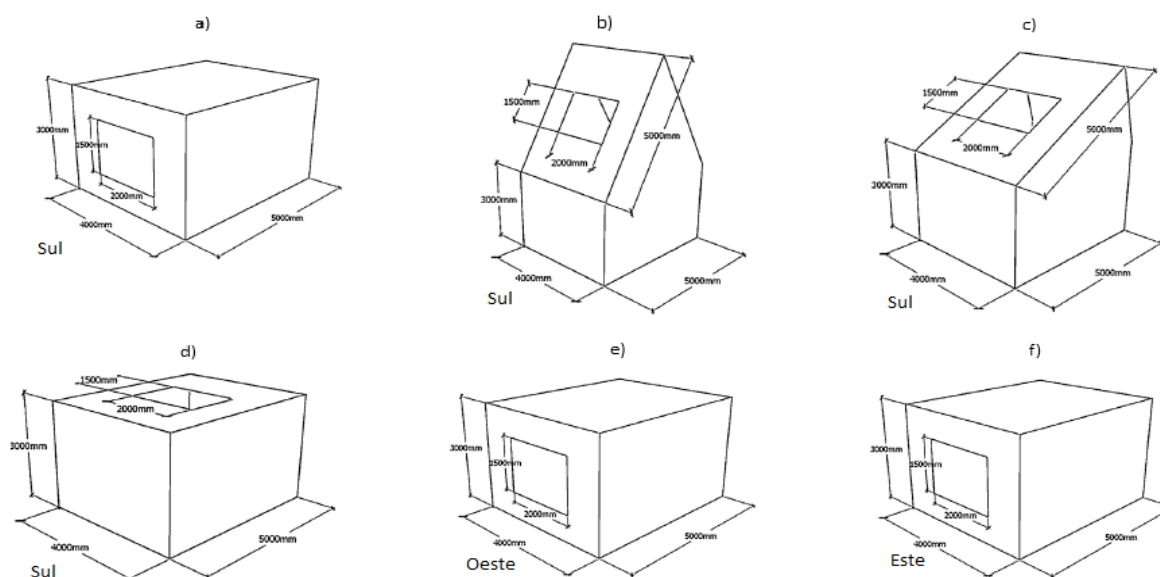


Figura 21 - Configuração dos diferentes edifícios simulados (adaptado de [5]).

As simulações foram executadas de modo a avaliar a inclinação da janela no desempenho energético do escritório para as 6 configurações. Para além da janela electrocromática, também foram feitas simulações com uma janela de vidro duplo e uma janela de vidro duplo de baixa emissividade, de modo a servir de referência para comparação com os resultados da literatura existente, e também para comparação com o desempenho energético com janela electrocromática. Os materiais utilizados nas paredes e telhado do escritório, bem como as suas propriedades térmicas, foram iguais a trabalhos encontrados na literatura [5], tendo se validado o modelo com base nesses resultados. Estes dados estão apresentados na Tabela 9. Ainda relativamente às propriedades das paredes e telhado, as propriedades que caracterizam o comportamento das superfícies à convecção e à radiação estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 9 – Propriedades termofísicas dos materiais utilizados no modelo desenvolvido




Componente da envolvente	Camada de material	Espessura (mm)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/(kgK))	k (W/mK)
Paredes interiores e exteriores	Alvenaria de tijolo (exterior)	110	2000	836,8	0,711
	Espuma de poliestireno de alta densidade	15	46	1130	0,008
	Espuma de poliestireno de baixa densidade	50	38	1130	0,033
	Blocos de cimento	110	1600	656,9	0,335
	Revestimento (interior)	10	1250	1088	0,431
Telhado	Telhas	50	2760	836,8	18,828
	Espuma de poliestireno de alta densidade	20	46	1130	0,008
	Espuma de poliestireno de baixa densidade	50	38	1130	0,033
	Revestimento	10	1250	1088	0,431

Tabela 10 - Propriedades das superfícies da envolvente quanto à radiação e à convecção [8]

Componente da envolvente	Superfície	ε	Absortividade solar	Coefficiente de convecção das paredes (kJ/(h.m ² .K))
Parede exterior	Exterior (tijolo)	0,85	0,8	64
	Interior (revestimento)	0,85	0,5	Algoritmo do TRNSYS [71]
Parede interior	Exterior (tijolo)	0	0	0
	Interior (revestimento)	0,85	0,5	Algoritmo do TRNSYS [71]
Telhado	Exterior (telhas)	0,85	0,8	64
	Interior (revestimento)	0,85	0,5	Algoritmo do TRNSYS [71]

Também, as janelas de vidro duplo e de vidro duplo com baixa emissividade foram escolhidas em acordo com o estudo de Allen et al. [5]. As propriedades térmicas destas janelas, assim como as da janela electrocromática escolhida são apresentadas na Tabela 11. Uma janela electrocromática (*SageGlass Gray 9mm lami full clear 45%T*) foi selecionada para estudo no *software Window 7.4* disponibilizado pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory*. O critério de seleção do envidraçado electrocromático favoreceu a escolha de um envidraçado com as características discutidas na secção 2.2.1.3, tendo, no entanto, este envidraçado uma transmissividade à radiação visível ligeiramente inferior às habituais (0,6 para o estado transparente e entre 0,035-0,15 para o estado mais escuro) uma coloração em tons de cinzento, que se acredita contribuir para um maior conforto visual.

Tabela 11 – Propriedades térmicas dos diferentes tipos de envidraçado utilizados

Tipo de envidraçado	Cor	Design	U (W/(m ² K))	g-Value	T _{sol}	R _{sol}	T _{vis}
Vidro duplo		2,5/12,7/2,5	2,95	0,777	0,727	0,129	0,817
Vidro duplo <i>low-E</i>		3/12,7/2,5	1,76	0,597	0,544	0,220	0,769
Electrocromático*: modo escuro (ID=1010)		8,8/12,7/3	1,82	0,107	0,002	0,058	0,006
Electrocromático*: modo intermédio (ID=1011)		8,8/12,7/3	1,82	0,160	0,061	0,058	0,152
Electrocromático*: modo transparente (ID=1012)		8,8/12,7/3	1,82	0,332	0,247	0,076	0,462

*obtido através da biblioteca do *software Window 7.4*

Os ganhos internos devido à ocupação humana e à iluminação foram normalizados para todas as simulações. O horário de ocupação e número de ocupantes estão apresentados na Tabela 12, estando de acordo com dados da literatura para um escritório [5].

Tabela 12 – Horário semanal do número de ocupantes no escritório

	00h-07h	07h-08h	08h-12h	12h-13h	13h-17h	17h-18h	18h-24h
Segunda a Sexta	0	1	2	1	2	1	0
Sábado	0	0	2	0	0	0	0
Domingo	0	0	0	0	0	0	0

Admitiu-se, que quando dentro do escritório, as pessoas estão sentadas a fazer trabalho leve, como, por exemplo, escrever no computador. As cargas de energia devido à ocupação foram calculadas de acordo com a norma ISO 7730 [72] (ver Tabela 13).

Tabela 13 – Dados referentes à atividade metabólica dos indivíduos [72]

Grau de atividade	Exemplo de aplicações	Calor total (W)	Calor sensível (W)	Calor latente (W)
Sentado a descansar	Teatro, cinema	100	60	40
Sentado a escrever muito levemente	Escritório, hotéis	120	65	55
Sentado a comer	Restaurante	170	75	95
Sentado, trabalho leve	Escritório	150	75	75
A pé, trabalho leve	Bancos, lojas	185	90	95

Para além disso, foi também admitido que quando alguém estivesse no escritório utilizaria um computador com uma potência de 230 W. A infiltração de ar foi assumida constante e com o valor de 0,085 m³/s, considerado apropriado para um edifício estanke [73], estando na Tabela 14 representado a respetiva taxa de infiltração para cada modelo.

Tabela 14 - Volume, taxa de infiltração, área de superfícies interiores e exteriores, da janela, do chão e do telhado

Configuração (ver Figura 21)	V (m ³)	Taxa de infiltração, (1/h)	Área de superfícies interiores (m ²)
A), d), e) e f)	60	5,10	94
b)	103,3	2,96	135,66
c)	85	3,60	116,85

A temperatura interior do edifício foi mantida entre 21,5°C e 22,5°C, durante o horário de ocupação. Desse modo, o sistema de arrefecimento é ligado quando a temperatura ultrapassa os 22,5°C e o sistema de aquecimento é ativado quando a temperatura é inferior a 21,5°C. O intervalo de temperaturas escolhido foi de apenas 1°C de modo a poder-se comparar os resultados das cargas de aquecimento e arrefecimento com as obtidas na literatura, onde se considerou uma temperatura de conforto de 22°C [5].

Para iluminação do espaço considerou-se que, estando o espaço ocupado, as luzes ligam-se caso a luminosidade média interior seja inferior a 450 lux, e desligam-se quando a luminosidade ultrapassa os 550 lux, tendo-se escolhido os limites com base na literatura [74]. O equipamento de iluminação por um tubo fluorescente (40% de convecção) com uma potência de 13 W/m².

No balanço térmico, como mostra a equação, o edifício (primeira parcela) irá ter ganhos internos (segunda parcela) devido à ocupação e às perdas de energia por calor dos equipamentos (dependem da ocupação e necessidades de iluminação – que depende da luminosidade transmitida pela janela); terá trocas de calor por convecção (terceira parcela) pela parede externa, pelo telhado, pela janela e através das infiltrações; terá trocas de calor (ganhos solares e trocas com a vizinhança) por radiação (quarta parcela) pela parede externa, pelo telhado (dependem da inclinação) e pela janela. Por fim, o edifício é também exposto a cargas de arrefecimento (quarta parcela) quando a temperatura ultrapassa os 22,5°C e a cargas de aquecimento (quinta parcela) quando a temperatura é inferior a 21,5°C, durante o horário de ocupação.

$$\rho V c_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = \dot{Q}_{\text{ganhos internos}} + \dot{Q}_{\text{convecção}} + \dot{Q}_{\text{radiação}} + \dot{Q}_{\text{aquecimento}} + \dot{Q}_{\text{arrefecimento}} \quad (7)$$

3.2 Estratégias de controlo de modulação da janela electrocromática

Em grande parte das análises feitas a um envidraçado electrocromático, a avaliação é feita através da comparação de um espaço com uma janela standard e um espaço com janela electrocromática [75]. As janelas electrocromáticas, para permitirem um uso inteligente da energia solar incidente, devem ter controlos inteligentes e simples. O objetivo das estratégias de controlo é escolher o parâmetro mais apropriado e estabelecer limites para ativação da mudança de estado da janela. Este trabalho será focado na eficiência energética e não tanto no conforto visual para os ocupantes. Nesse sentido, criaram-se inicialmente 6 controlos diferentes, sendo testados para cada uma das orientações e inclinações da janela. Estes controlos, embora baseados nos mesmos parâmetros poderão sofrer, poderão sofrer alterações nos limites conforme o modelo do espaço, caso se observe que essa mudança diminui os gastos energéticos. Esta análise não será o foco do trabalho, uma vez que a otimização de um controlo é um processo complexo.

Existem muitas possibilidades quanto ao controlo da janela. Os controlos desenvolvidos foram baseados no horário de ocupação do espaço, na luminosidade interior em cada um dos estados, nas cargas de aquecimento, na temperatura exterior e na radiação incidente no plano horizontal e no plano da janela.

3.2.1 Estratégia com base na ocupação e necessidade de aquecimento (Controlo 1)

Esta estratégia de controlo será também referida por estratégia de controlo 1 ou EC1 e permite um controlo bastante simples baseada numa estratégia encontrada na literatura [76]. Com este controlo a janela assume o estado mais escuro, quando o espaço não está ocupado; o estado

intermédio, quando o espaço está ocupado e o aquecimento não está ligado; e o estado transparente quando o aquecimento está ligado. O principal funcionamento do controlador é garantir que os ganhos solares sejam máximos quando há necessidades de aquecimento. Quando não há aquecimento, a estratégia de controlo garante uma boa visibilidade do interior para o exterior, apresentando-se no estado intermédio quando o espaço está ocupado e impedindo ganhos solares fora do horário de trabalho. Uma representação esquemática do controlador encontra-se na Figura 22.

Quando o espaço não está ocupado, opta-se por manter o envidraçado no estado escuro, uma vez que fora do horário de ocupação apenas haverão ganhos significativos durante os meses de arrefecimento (número de horas em que há insolação é superior). Como tal, opta-se por reduzir esses ganhos. Este critério foi utilizado nas estratégias 1 a 5, apresentados nas subsecções seguintes.

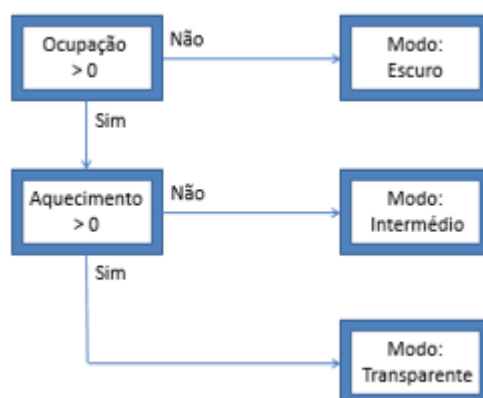


Figura 22 - Estratégia de controlo 1 / Aquecimento + Ocupação.

3.2.2 Estratégia com base na radiação incidente na janela (Controlo 2)

A estratégia com base na radiação incidente na janela é igual à anterior quando o espaço não está ocupado. No entanto, durante o horário de ocupação o controlo é feito pela radiação incidente no plano da janela [77]. Neste controlador, a intensidade da radiação incidente na janela é comparada com o limite inferior, I_1 , e o limite superior, I_2 . Como mostra a Figura 23, quando a radiação incidente é menos intensa do que I_1 , o envidraçado apresenta-se no seu modo mais transparente. Quando a radiação incidente tem uma intensidade entre I_1 e I_2 , esta assume o seu modo intermédio. Finalmente, quando a radiação incidente é superior a I_2 , a janela toma o modo mais escuro. De salientar que, I_1 foi definido $2400 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$ e I_2 $2800 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$, para todas as simulações e estratégias de controlo. Estes limites foram definidos arbitrariamente.

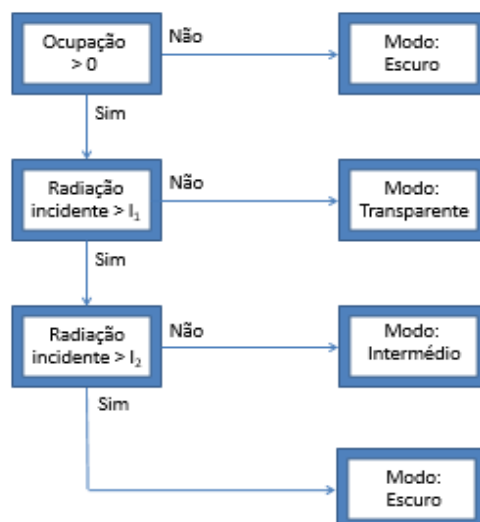


Figura 23 - Estratégia de controlo 2 / Ocupação + Radiação incidente no plano do envidraçado.

3.2.3 Estratégia de com base na previsão da radiação (Controlo 3)

A estratégia de controlo 3 é semelhante à anterior. No entanto, durante o horário de ocupação o controlo é executado através da previsão com 2h de antecedência da radiação incidente no plano da janela. Esta estratégia é a primeira estratégia de controlo baseada na previsão de condições meteorológicas. Para testar o desempenho, assumiu-se que são conhecidos os níveis da radiação passados 2h. Esta abordagem ainda não foi testada, mas poderá aproveitar as novas tecnologias já existentes em algumas casas. Comparando a Figura 23 com a Figura 24, podemos verificar que de facto a única diferença nos controlos se deve à estratégia de controlo 3 ter em consideração os ganhos solares no espaço 2h depois, enquanto que a estratégia de controlo 2 se baseia nos ganhos solares do momento.

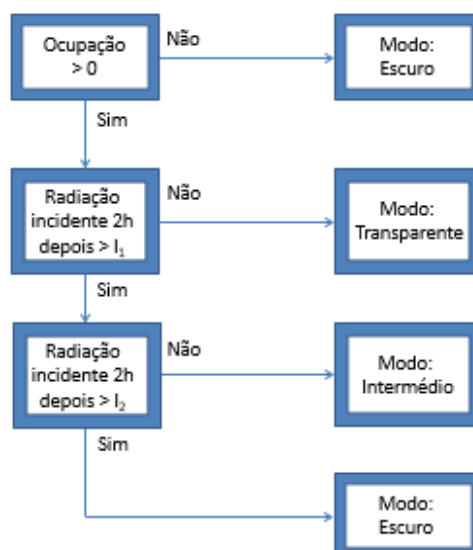


Figura 24 - Estratégia de controlo 3 / Ocupação + Radiação incidente no plano do envidraçado 2h depois.

3.2.4 Estratégia de controlo com base na radiação incidente no plano horizontal (Controlo 4)

A estratégia de controlo 4 (EC4) é semelhante à estratégia de controlo 2. No entanto, o controlo, durante o horário de ocupação, é feito pela radiação incidente no plano horizontal, independentemente da inclinação da janela. Como mostra a Figura 25, quando a radiação incidente é menos intensa do que I_1 , o envidraçado apresenta-se no seu modo mais transparente. Quando a intensidade da radiação incidente fica entre I_1 e I_2 , esta assume o seu modo intermédio. Finalmente, quando a radiação incidente é superior a I_2 a janela toma o modo mais escuro. Este controlo foi idealizado uma vez que a intensidade de radiação incidente no plano horizontal no verão é, geralmente, muito superior à intensidade de radiação incidente no mesmo plano no inverno. Assim, no inverno, a radiação incidente raramente ultrapassa I_1 , mantendo a janela no estado transparente neste período. Desta forma, é possível a maximização dos ganhos solares no inverno.

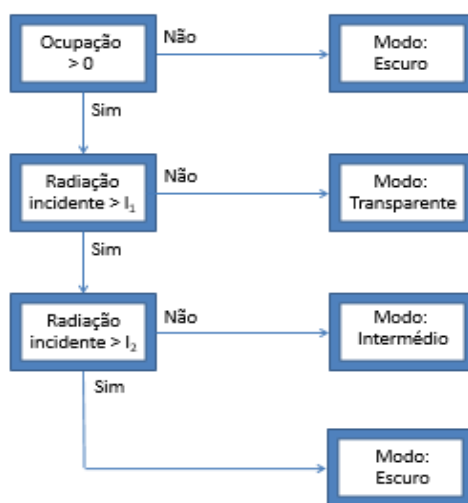


Figura 25 -Estratégia de controlo 4 / Ocupação + Radiação incidente no plano horizontal.

3.2.5 Estratégia com base na previsão da radiação incidente no plano horizontal (Controlo 5)

A estratégia de controlo 5 (EC5), tal como a EC3 baseia-se num critério de previsão, logo a sua eficácia irá depender não só da sua capacidade em reduzir os consumos energéticos, mas também na qualidade das previsões. Neste projeto, assume-se que se conhece sem incerteza associada a radiação que irá incidir no plano horizontal com 2h de antecedência. Assim, durante o horário de ocupação o controlo é executado através da radiação incidente no plano horizontal prevista daí a 2h. Deste modo, caso a previsão da radiação aponte para que esta tenha uma intensidade menor do que I_1 , a janela apresenta o modo transparente. Se a previsão da radiação incidente no plano horizontal estiver entre I_1 e I_2 , esta apresenta o modo intermédio. Por último, caso a previsão da radiação incidente no plano horizontal for superior a I_2 , a janela transita para o estado escuro. Como pode ser concluído as estratégias de controlo 2, 3, 4 e 5 são muito semelhantes. Na Figura 26, está representado um esquema do funcionamento da estratégia de controlo 5.

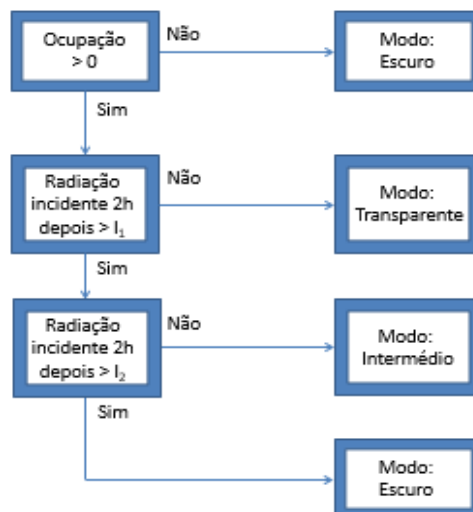


Figura 26 - Estratégia de controlo 5 / Ocupação + Radiação incidente no plano do horizontal 2h depois.

3.2.6 Estratégia de controlo com base na luminosidade média interior e na temperatura exterior (Controlo 6)

A estratégia de controlo 6 baseia-se nas variáveis horário de ocupação, temperatura exterior (T_{amb}) e luminosidade interior (E_v), minimizando as cargas de iluminação. A luminosidade exterior é, normalmente, proporcional à quantidade de radiação que incide na janela, sendo a luminosidade interior tal como os ganhos solares, dependente da transmissividade do envidraçado. A luminosidade interior é calculada para os três modos (modo escuro – $E_{v,1}$; modo intermédio – $E_{v,2}$; modo transparente – $E_{v,3}$).

Como esquematiza a Figura 27, quando o espaço está ocupado, se a luminosidade interior calculada com o modo escuro da janela for superior a 550 lux (valor mínimo para as luzes desligarem), o envidraçado assume o modo escuro. Caso contrário, a luminosidade interior, calculada com a janela em modo intermédio for superior a 550 lux, o envidraçado toma o estado intermédio. Se a luminosidade interior com o modo intermédio for inferior a 550 lux, mas a luminosidade interior com o modo transparente superior a 450 lux, o envidraçado muda para o modo transparente. Caso mesmo com o envidraçado no seu modo transparente, existirem necessidades de iluminação do espaço, o parâmetro de controlo passa a ser a temperatura exterior. Nesse caso, se T_{amb} for superior a T_2 , o envidraçado apresenta o seu modo escuro. Se, pelo contrário, a T_{amb} for inferior a T_2 , o envidraçado muda para o modo transparente. Por outro lado, quando o espaço não está ocupado, o parâmetro de controlo é a temperatura exterior, também, funcionando como na situação anterior. No entanto, o limite não é T_2 , mas sim T_1 . Na Tabela 15 estão resumidos os parâmetros T_1 e T_2 de controlo utilizados para as diferentes configurações de edifício.

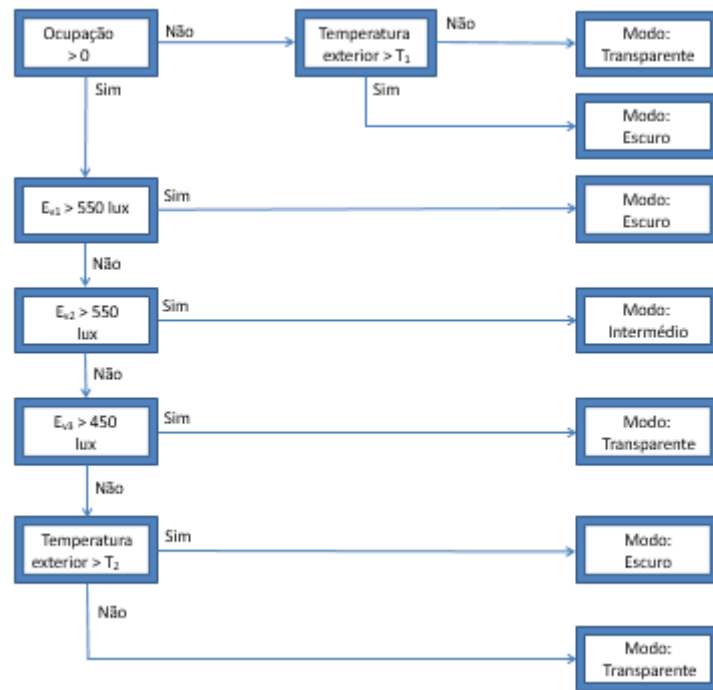


Figura 27 - Estratégia de controlo 6 / Ocupação + Luminosidade média interior + Temperatura exterior.

Tabela 15 - Parâmetros de controlo utilizados

Parâmetro	Configuração a), e) e f)	Configuração b), c) e d)
T_1 (°C)	19	18
T_2 (°C)	21	19

sul (e a fração da área da parede que esta ocupa). O *building wizard* gera um projeto TRNSYS, já com algumas ligações necessárias e um controlo da necessidade de iluminação artificial definido pela radiação incidente.

O *simulation studio* é a interface onde se relaciona os componentes que constituem o modelo do sistema, estabelecendo as relações entre os modelos matemáticos que descrevem os componentes, definem os intervalos de tempo da solução numérica e realizam-se as simulações. O modelo de um sistema é composto por componentes (*Types*) que podem ser seleccionados da biblioteca ou elaborados.

4.1.1 Dados meteorológicos (Type 15-6)

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos no *Meteonorm*, que compila informações de vários anos de estudo, baseado nas medições de 8325 estações meteorológicas que fornecem médias mensais dos parâmetros: radiação global, temperatura do ar ambiente, humidade, dias com precipitação, velocidade do vento, direcção do vento, duração do dia.

O Type 15- 6 foi utilizado de modo a ler o ficheiro meteorológico, a interpolar para intervalos de tempo menores que uma hora e a tornar a informação disponível para os outros componentes do projeto.

4.1.2 Edifício

O Type 56/*Building* permite a definição da estrutura e das propriedades termofísicas das paredes, assim como a sua área e a sua orientação. Para além disso, permite definir os ganhos internos devidos à ocupação, iluminação e outros equipamentos (impressoras/computadores).

Este componente requer como dados de entrada a radiação total, direta e o ângulo de incidência para as orientações das paredes definidas, assim como a temperatura exterior, entre outras. Este permite ainda a utilização de funções exteriores para a definição dos momentos em que a iluminação, aquecimento e arrefecimento está ligado. Embora este componente defina para a iluminação a potência da lâmpada e percentagem de potência convectiva, este apenas calcula o contributo térmico da iluminação para o edifício.

O Type 56, depois de corretamente definido o edifício, realiza vários cálculos térmicos, podendo o utilizador escolher os resultados que quer analisar ou obter, seleccionando os dados de saída. Os resultados mais relevantes neste projeto foram o consumo de energia para arrefecimento e o consumo de energia para aquecimento, tendo estes sido, posteriormente integrados mensalmente no Type 28b. Para além destes, o horário de ocupação, que foi definido internamente no Type 56, também foi usado fora deste componente para definir a estratégia de controlo. De modo, a validar o modelo também se seleccionou para as configurações a), b), c) e d), com janela de vidro duplo e janela de vidro duplo de baixa emissividade as variáveis B4_QSOL (que inclui os ganhos solares nas paredes) e B4_QSOLAIR (que engloba os ganhos solares, imediatamente, transformado em calor convectivo para o ar). Estas duas variáveis são, de seguida, somadas e integradas mensalmente caracterizando a quantidade de ganhos solares em cada mês.

4.1.3 Implementação do controlador da iluminação (função BRIGHT)

Inicialmente ao criar um novo modelo, o *building wizard* define a função BRIGHT (no componente “Luz” – na Figura 28) para que esta tome o valor 1 quando a radiação é inferior a um dado limite (permitindo a sua definição), tomando o valor 0 quando a radiação ultrapassa um limite ligeiramente superior (limites definidos na equação “limites luminosidades” - ver Figura 28). Sendo o objetivo do projeto que o controlo da luz seja feito pela luminosidade

média interior, deve-se substituir o dado de entrada da radiação, por um que indique a luminosidade média interior. Os dados meteorológicos disponíveis para utilização no TRNSYS englobam a luminosidade global no plano horizontal. O *Type 15-6* usa um modelo estatístico para calcular a luminosidade direta normal e difusa horizontal. No entanto, o TRNSYS não tem nenhum componente que calcule diretamente a luminosidade incidente numa superfície inclinada como tem para a irradiação. A literatura [78] aconselha a obter a luminosidade difusa noutro plano, através da luminosidade difusa horizontal com base em modelos, como, por exemplo, o modelo de Pérez [79]. Este modelo é também utilizado pelo *Type 16*, no modo 4, para calcular radiação incidente noutros planos através da radiação global no plano horizontal e a radiação direta normal [71]. O modelo de Pérez considera o brilho do horizonte e circunsolar, assim como a radiação difusa isotrópica, com o auxílio dos coeficientes empíricos de brilho. Os coeficientes de brilho (F'_1 e F'_2) são função dos parâmetros de transparência do céu (ϵ) e do seu brilho (Δ). O *Type 16* calcula estes parâmetros automaticamente, dando como resultado a radiação total incidente numa superfície, requerendo como dado de entrada apenas o azimute e inclinação da superfície, a radiação global horizontal, a radiação direta normal, a refletividade do solo e a radiação extraterrestre. A luminosidade direta e refletida numa superfície inclinada pode ser calculada através da luminosidade global horizontal e luminosidade direta normal com as devidas considerações geométricas (inclinação da superfície), como acontece com a radiação. Como os cálculos são iguais para a luminosidade, usando como dado de entrada do *Type 16* a luminosidade global horizontal (no lugar da radiação global horizontal), a luminosidade direta normal (no lugar da radiação direta normal) e a luminosidade extraterrestre (em vez da radiação extraterrestre). Por último, para calcular a luminosidade média interior deve-se criar uma equação (“luminosidade média interior” – ver Figura 28), com as variáveis área da janela ($A = 3 \text{ m}^2$), a transmissividade visível da janela (depende para cada modelo – T_v – ver Tabela 9), a área de superfícies interiores (também varia para cada modelo – A_{in} – ver Tabela 12), o quadrado da refletividade média das paredes ($R = 0,25$) e a luminosidade global no plano da janela e escrever a seguinte equação:

$$E_{in} = (A_{in} * T_v * E_{g,\beta}) / (A * (1-R)) \quad (8)$$

Por fim, o resultado desta equação deve ser ligado ao componente “Luz” (ver Figura 28) e os limites devem ser alterados para 550 (para ligar a luz) e 450 (para desligar a luz). Esta alteração resulta em que a função BRIGHT assuma o valor 0 quando a luminosidade média interior é superior a 550 lux e o valor 1 quando a luminosidade é inferior a 450 lux.

Como se pretende que a luz só esteja ligada caso o espaço esteja ocupado, esta função deve ser multiplicada, ainda, pela função do horário de ocupação (criada no *Type 56*), adicionando-se uma equação (“Necessidades de iluminação + ocupação”) ao projeto para esse efeito.

4.1.4 Implementação do controlador da modulação da janela electrocromática

A função de controlo da janela foi criada numa ou mais equações (“Critério” e “Window Control” na Figura 28) fora do *Type 56*. Esta toma o valor 0 quando se pretende que a janela apresente o seu modo escuro; o valor 1 quando se pretende o modo intermédio e o valor 2 quando o modo transparente é requerido. Isto, uma vez que a soma da função gerada com 1010 deverá ser igual ao ID do modo da janela pretendido (ver Tabela 11). Para esse efeito foi utilizada a função $GT(\text{dado de entrada}, \text{limite}) * b$. Esta função toma o valor b quando um determinado dado de entrada é superior a um determinado limite. Por exemplo, para a estratégia de controlo 1, utiliza-se como dado de entrada as necessidades instantâneas de

aquecimento (dado de saída do *Type 56*) e o horário de ocupação (dado de saída do *Type 56*). Utilizando a função $a = GT(\text{Aquecimento}, 0) * 2 + (1 - GT(\text{Aquecimento}, 0)) * 1$ e multiplicando esta função pelo horário de ocupação obtém-se a função da estratégia de controlo 1. A função da estratégia de controlo é dado de entrada do *Type 56*.

Para além disso, a função da estratégia de controlo deve também ser usada para definir a transmissividade visível da janela no cálculo da luminosidade média interior, uma vez que o *Type 56* não permite que este valor seja dado de saída. A definição pode ser feita numa equação com o auxílio da função $GT(\text{dado de entrada}, \text{limite}) * b$.

4.1.5 Implementação das estratégias de controlo 3 e 5

De modo a implementar as estratégias de controlo 3 e 5, o modelo sofreu mudanças significativas. O objetivo das estratégias de controlo 3 e 5 passa por manter um controlo do modo apresentado pela janela que se apoie na radiação prevista daí a 2 horas. Embora a implementação deste controlo num caso real fosse feita, partindo de previsões de 2h sustentadas em dados de uma ou mais estações meteorológicas (tendo em atenção a velocidade, sentido e direção do vento), na simulação TRNSYS utilizou-se o mesmo ficheiro meteorológico.

Assim, procurou-se na biblioteca do TRNSYS um componente que permitisse atrasar o modelo em relação aos componentes responsáveis pelo controlo da janela. O componente utilizado para este propósito foi o *Type 661*. No *Type 661* os dados de saída assumem o valor que o respetivo dado de entrada tomou n intervalos de tempo antes. O número n tem que ser alterado na lista de parâmetros. Como mostra a Figura 29, todos os dados de entrada do *Type 56/Building* (radiação total e direta incidente na superfície, ângulo de incidência, temperatura exterior, temperatura do céu, azimuth e luminosidade incidente, etc) exceto o controlo passam pelo *Type 661*, sofrendo um atraso de 2 h relativamente ao critério de radiação do controlo. Como o horário de ocupação foi criado internamente no *Type 56*, este também deverá ser atrasado 2 h, para que haja coordenação entre o horário solar e o horário de ocupação.

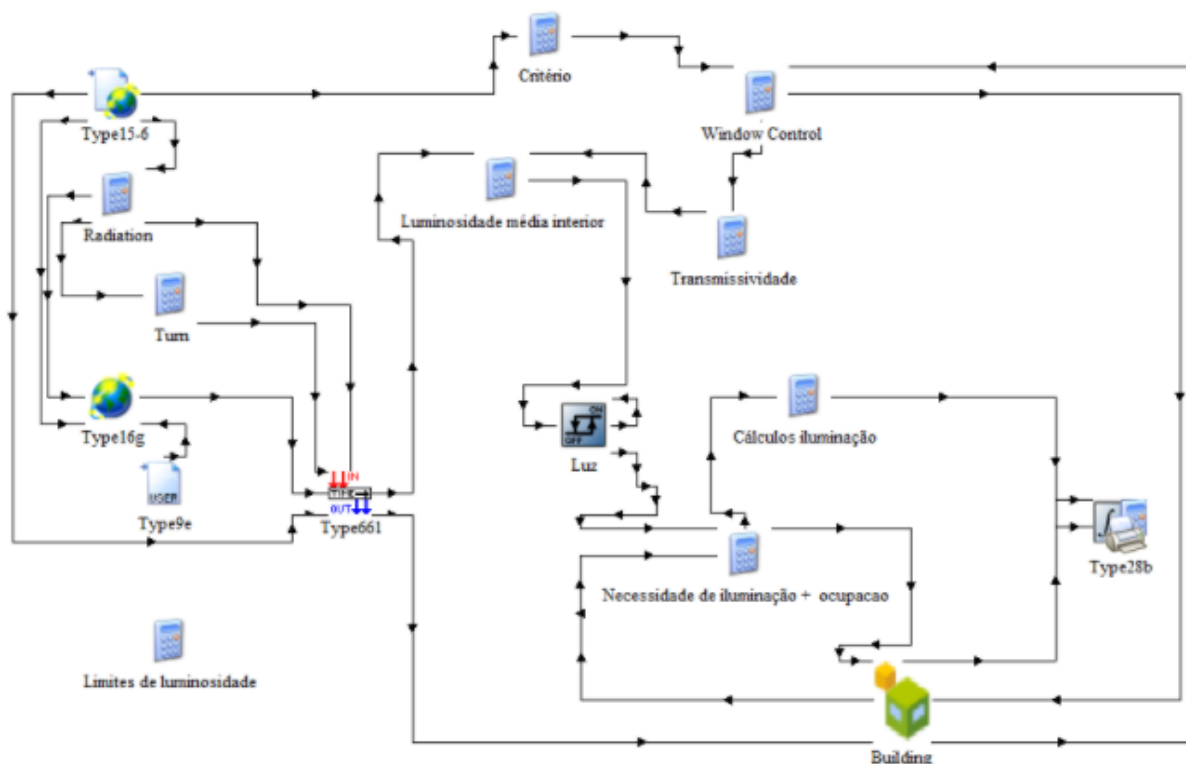


Figura 29 – Modelo final do ficheiro TRNSYS com implementação das estratégias de controlo 3 e 5.

5 Resultados obtidos

5.1 Validação do modelo TRNSYS

Com a implementação do modelo em TRNSYS iniciaram-se as simulações. Na primeira parte, procurou-se validar os resultados para os modelos com vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade para as configurações a), b), c) e d) com dados publicados em [5]. Como foi dito anteriormente, nesse estudo publicado [5], utilizou-se um modelo de um edifício em Palermo, para testar uma janela inteligente que altera as suas propriedades óticas dependendo da temperatura da janela, permitindo um controlo passivo do estado da janela. Tal como neste modelo as janelas foram testadas em diversas configurações (a), b), c) e d)), e o desempenho da janela inteligente foi comparado com a janela de vidro duplo e a janela de vidro duplo de baixa emissividade. Desse modo, para verificação dos resultados serão comparados alguns resultados para estas configurações e janelas.

De modo a verificar se haveriam diferenças significativas nos resultados obtidos para os ganhos solares no escritório entre o modelo desenvolvido e o modelo cujos resultados estão publicados na literatura, está apresentado na Tabela 16 o ganho solar anual com a janela de vidro duplo e vidro duplo *low-E* para as 4 configurações utilizadas para a validação dos resultados, assim como o erro absoluto e o erro relativo.

Tabela 16 - Ganhos solares para a janela de vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade obtidos nas simulações [5]

Tipo de vidro	Configuração	Ganho solar anual publicado (kWh/m ²) [5]	Ganho solar anual obtido (kWh/m ²)	E _{absoluto} (kWh/m ²)	E _{relativo} (%)
Vidro duplo	a)	750	802	52	6,9
	b)	1200	1150	-50	-4,2
	c)	1350	1372	22	1,6
	d)	1150	1182	32	2,8
Vidro duplo com baixa emissividade	a)	600	581	-19	-3,6
	b)	900	840	-60	-6,7
	c)	1050	1007	-43	-4,1
	d)	850	862	12	1,4

O erro absoluto foi calculado pela diferença entre o ganho solar anual obtido na simulação e o ganho solar anual publicado na literatura. Um valor positivo para o erro absoluto significa que no modelo implementado se obtiveram ganhos solares superiores, enquanto que um valor negativo significa que para essa configuração os ganhos solares no modelo implementado são menores. O erro relativo representa a razão entre o erro absoluto e o ganho solar anual publicado na literatura, estando expresso em percentagem.

Como pode ser visto, o erro absoluto máximo nos resultados do ganho solar anual ocorreu para a janela de vidro duplo com baixa emissividade na configuração b), havendo menores ganhos solares anuais de 60 kWh/(m²-janela) no modelo implementado. A janela de vidro duplo apresenta também para a configuração b) uma diminuição dos ganhos solares de cerca de 50 kWh/(m²-janela). Contrabalançando, há um ligeiro aumento dos ganhos solares para a configuração d), de 32 kWh/(m²-janela), para a janela de vidro duplo, e 12 kWh/(m²-janela) para a janela de vidro duplo *low-E*.

Os ganhos solares pela janela dependem da radiação incidente na superfície, assim como da transmissividade, refletividade, absortividade e emissividade das superfícies envidraçadas. Uma das possíveis razões para as diferenças entre o modelo TRNSYS e [5] pode ser o facto das janelas de vidro duplo e de vidro duplo com baixa emissividade terem sido consideradas com propriedades térmicas ligeiramente diferentes das de [5], com estas presentes na Tabela 17. Comparando os valores da Tabela 17, embora não seja possível uma comparação completa entre as propriedades térmicas das janelas utilizadas e as de [5], por não estarem disponíveis todas as propriedades térmicas necessárias para caracterizar as janelas utilizadas em [5]. No entanto, é possível concluir que para a janela de vidro duplo a menor refletividade solar do que a da janela de referência, resultou num aumento dos ganhos solares em todas as configurações, exceto na configuração b). Por outro lado, no caso da janela de baixa emissividade, que tem uma refletividade igual à de referência, os ganhos solares são menores do que na referência, sendo superiores apenas para a janela com inclinação de 0°. Estes resultados são inesperados, uma vez que a transmissividade solar da janela é superior à da referência. No entanto, como não é sabida a emissividade da janela usada na simulação, novamente não se pode fazer uma análise rigorosa.

Tabela 17 - Propriedades térmicas das janelas de vidro duplo e de vidro duplo de baixa emissividade

	Vidro duplo [5]	Vidro duplo (simulação)	Vidro <i>low-E</i> [5]	Vidro <i>low-E</i> (simulação)
U (W/(m ² K))	2,70	2,95	1,70	1,76
<i>g-Value</i>		0,777		0,597
T _{sol}	0,79	0,73	0,53	0,54
R _{sol}	0,16	0,13	0,22	0,22
T _v		0,82		0,77

Além destas diferenças nas propriedades térmicas da janela, a literatura [5] não indica claramente os dados climáticos que utilizou nas simulações. Na simulação, obteve-se ganhos solares mais elevados para a configuração d) do que para a b) (32 kWh/(m²-janela) com janela de vidro duplo e 22 kWh/(m²-janela) com janela de vidro duplo *low-E*), acontecendo o contrário nos resultados obtidos em [5]. A radiação solar incidente numa superfície depende do ângulo de altura solar e do azimuth, assim como da orientação e inclinação da superfície. Para além disso, a radiação solar incidente numa superfície depende

também da radiação solar extraterrestre, que é maior no inverno (hemisfério norte), assim como da transmissividade da atmosfera terrestre num dado momento do ano. Uma vez que os ganhos solares mensais também não estão disponíveis em [5], não se pode verificar diretamente se existem diferenças nas condições meteorológicas ao longo do ano. Deste modo, procurou-se analisar em que meses a configuração d) terá ganhos solares superiores à configuração b) através da variação do ângulo que a altura solar média faz com a normal à superfície. De forma geral, o azimuth não influencia os resultados de ganhos solares, uma vez que em todas as configurações utilizadas para validação, a superfície envidraçada está orientada a Sul. No entanto, pode-se concluir que as superfícies envidraçadas com inclinação que favoreçam os ganhos solares nos meses em que o azimuth solar varia mais (dias mais longos – mais próximos do solstício de verão), terão ganhos solares mais elevados.

O ângulo de altura solar varia ao longo do dia, aumentando até as 12h, atingindo o seu máximo, e diminuindo até 0. A altura solar também varia ao longo do ano, aumentando de 21 de dezembro a 21 de junho atingindo o seu máximo e diminuindo depois. Para alturas solares elevadas, haverá maiores ganhos solares para planos de baixa inclinação (0° - configuração d) e 30° - configuração c)). Pelo contrário, para alturas solares baixas, haverá maiores ganhos solares em superfícies envidraçadas com grande inclinação (60° - configuração b) e 90° - configuração a)). Na Figura 30, está representado a evolução do ângulo da normal à superfície da janela com a altura solar média às 12h para as 4 configurações. Como quanto menor for esse ângulo maiores são os ganhos solares, podemos concluir que a janela com inclinação de 0° (configuração d)) permite, geralmente, ganhos solares superiores nos meses de abril a agosto do que a janela com inclinação de 60° (configuração b)). Deste modo, poder-se-á dizer que a radiação média incidente nos meses de abril a agosto foi superior no modelo implementado neste trabalho do que no modelo simulado em [5], acontecendo o contrário nos restantes meses. Isto pode-se dever à utilização de um ficheiro meteorológico obtido com base em dados ligeiramente diferentes (de uma estação meteorológica diferente ou relativos a períodos de tempo diferentes) ou a diferenças entre o software TRNSYS e Energy Plus (utilizado em [5]).

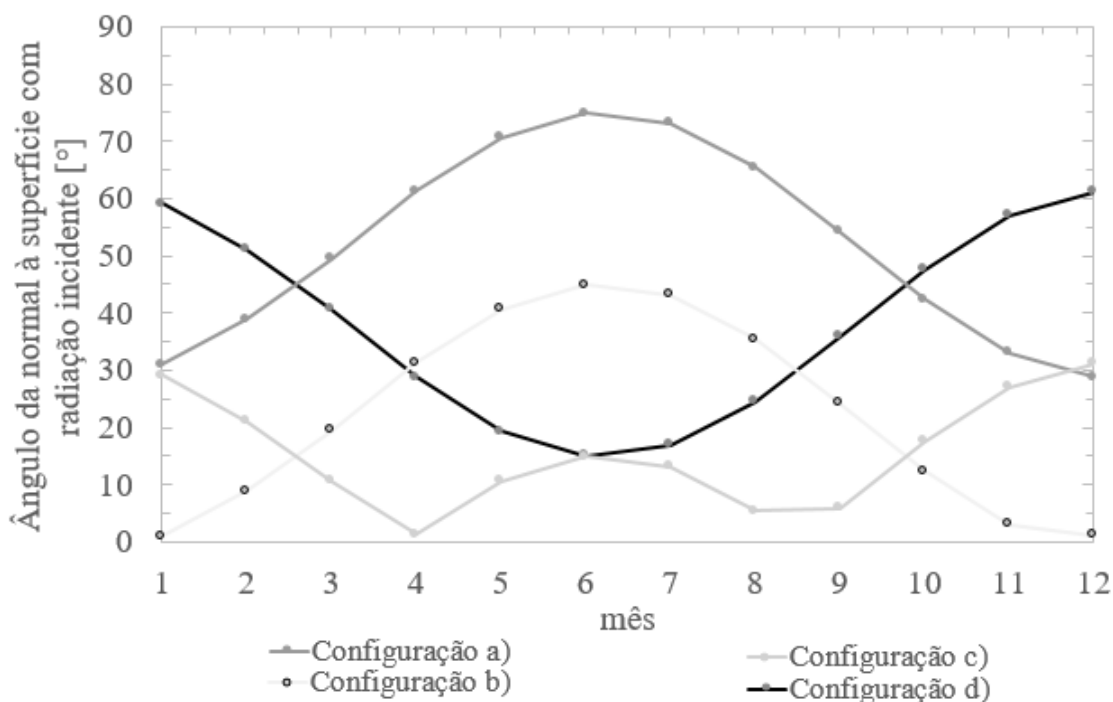


Figura 30 - Ângulo que o plano normal à superfície envidraçada faz com a altura solar média mensal às 12h para as configurações a), b), c) e d)

Outro dado publicado em [5] que reforça a ideia da utilização de um ficheiro meteorológico diferente, é a variação dos consumos de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação com janela de baixa emissividade para a configuração d) ao longo do ano. Como se sabe, ao longo do ano os ganhos internos pelos equipamentos e ocupação vão ser constantes. No entanto, as condições externas variam. Entre as condições externas, aquelas que afetam de forma mais significativa são a temperatura exterior e a radiação incidente. De modo a melhor avaliar e comparar a variação dos consumos de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação com janela de baixa emissividade para a configuração d) com [5], está representado o ganho solar mensal pela janela de baixa emissividade na configuração d), na Figura 31, e a temperatura média mensal do ambiente, durante o horário de trabalho e às 7h, assim como, a temperatura mínima e máxima mensal, na Tabela 18. Uma análise rápida, permite verificar que os meses de ganhos solares altos são maio, junho, julho e agosto; os meses de ganhos solares médios são março, abril, setembro e outubro; e os meses de ganhos solares baixos são janeiro, fevereiro, novembro e dezembro.

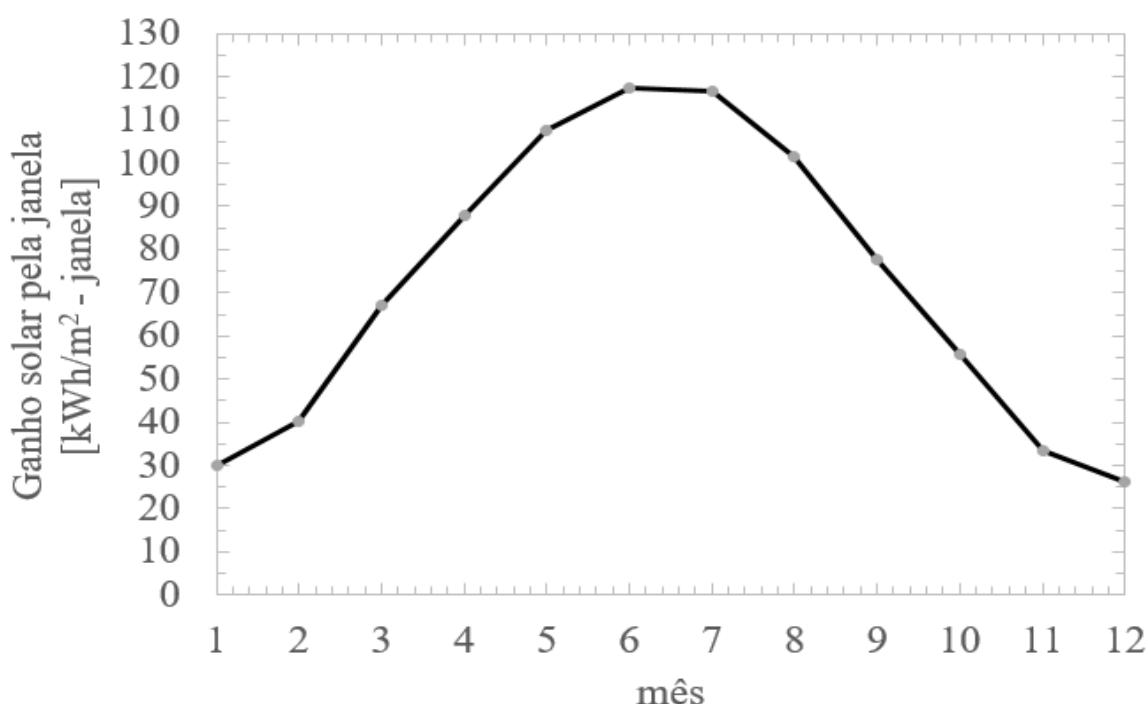


Figura 31 - Ganhos solar total mensal através da janela de baixa emissividade na configuração d)

Pela Tabela 18, verifica-se que os meses em que os ganhos por convecção nas paredes e através das infiltrações serão superiores são os meses de agosto, julho, setembro, junho e maio, uma vez que nestes meses a temperatura do ambiente exterior será superior à temperatura de conforto no escritório. Por outro lado, durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, o edifício perde calor por convecção e através das infiltrações, uma vez que a temperatura exterior é sempre inferior a 21,5°C). Por fim, durante os meses de abril, maio e novembro há variação entre períodos do dia em que há perdas e períodos com ganhos.

Uma comparação do consumo de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação entre os resultados do presente trabalho e os publicados [5] está apresentada na Figura 32. Em primeira análise, pode-se verificar que os resultados obtidos para o consumo de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação são coerentes com os dados da Figura 31 e da Tabela 18.

Tabela 18 - Temperatura máxima mensal, temperatura mínima mensal, temperatura média mensal às 7h e temperatura média exteriores durante horário de trabalho em cada mês

Mês	Temperatura mínima (°C)	Temperatura média as 7h (°C)	Temperatura média (°C)	Temperatura máxima (°C)
Janeiro	5	10	13	21
Fevereiro	6	10	14	20
Março	6	10	15	24
Abril	8	12	17	26
Maio	12	16	20	29
Junho	16	20	24	32
Julho	19	23	27	36
Agosto	20	23	27	34
Setembro	16	21	25	33
Outubro	14	17	22	31
Novembro	9	13	17	27
Dezembro	7	12	15	22

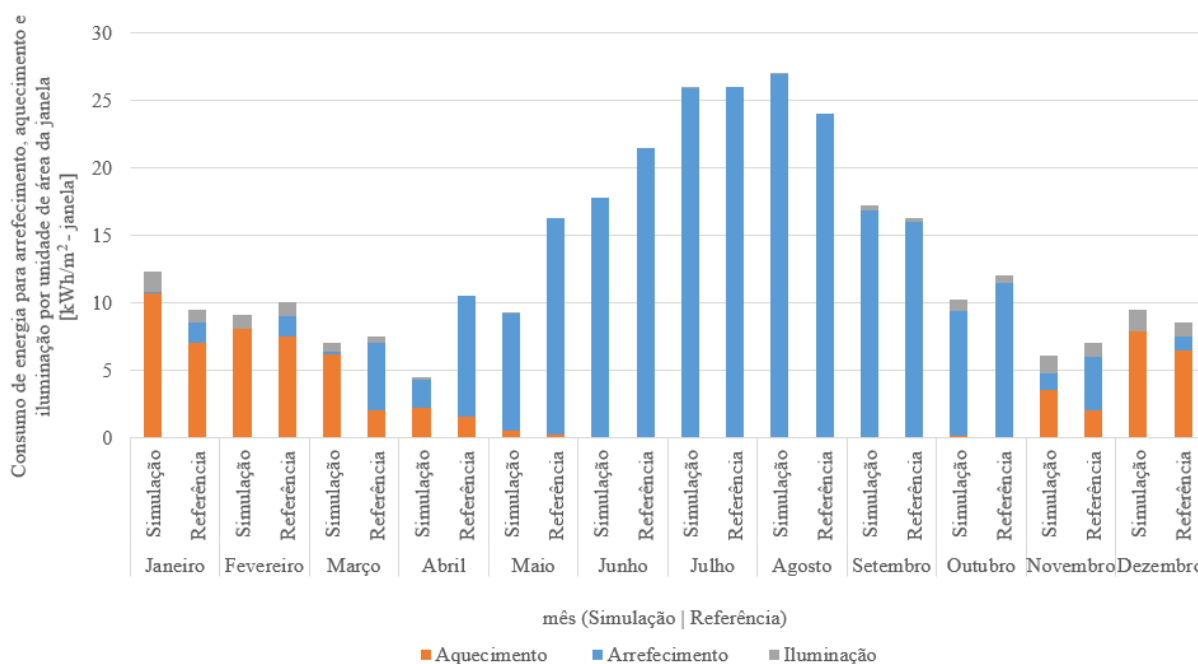


Figura 32 – Consumo de energia mensal para arrefecimento, aquecimento e iluminação com janela de vidro de baixa emissividade na configuração d)

Assim, durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro, as cargas de iluminação foram superiores 1 kWh/(m² – janela), uma vez que a radiação incidente (fonte de calor e de luz) é baixa (ganho solar inferior a 50 kWh/(m² – janela), e o consumo de energia para aquecimento é elevado, sendo para janeiro superior a 10 kWh/(m² – janela) (perdas elevadas de calor por convecção e ganhos solares baixos). Durante o mês de março, devido à radiação incidente na janela ser superior (ganho solar superior a 60 kWh/(m² – janela)), o consumo de energia para

iluminação foi menor ($<1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$), assim como o de aquecimento ($6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$). No entanto, o efeito das temperaturas (ver Tabela 18) exteriores tem um grande peso (5,1 renovações por hora). Comparando o mês de março com dezembro que apresentou uma temperatura média semelhante, cerca de 15°C , verifica-se que os ganhos solares mais altos em março (em cerca de $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$) manifestaram-se com uma pequena redução ($1,74 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$) das necessidades de energia para aquecimento. Os meses de novembro e abril apresentaram temperaturas exteriores semelhantes (diferença da temperatura média de 1°C), apesar de o mês de novembro apresentar temperaturas um pouco mais altas. No entanto, como em abril o número de horas de sol é superior e a altura solar é mais elevada (radiação incidente maior) este apresentou necessidades energia para arrefecimento $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$ superiores e resultou num consumo de energia para aquecimento e iluminação menores $1,3$ e $1,13 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$, respetivamente. No mês de outubro, existem necessidades de energia para iluminação significativas ($0,93 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$), não havendo, no entanto, necessidades de energia para aquecimento (ao contrário do mês de março) uma vez que a temperatura média neste mês foi 22°C . Nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro, sendo meses em que se registam temperaturas maioritariamente acima de 22°C e em que a radiação incidente permitiu ganhos solares superiores a $70 \text{ kWh}/(\text{m}^2 - \text{janela})$, o consumo de energia para arrefecimento são praticamente iguais às necessidades globais.

Analizando, ainda, a Figura 32, constata-se que na maioria dos meses as cargas de aquecimento obtidas no presente trabalho são superiores às publicadas em [5] e as cargas de arrefecimento são inferiores (exceto para os meses de julho, agosto e setembro). Na verdade, nos meses em que a radiação solar incidente na janela inclinada a 60° é mais intensa do que a que incide na superfície inclinada a 0° (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro, dezembro - exceto em setembro), os consumos de energia para aquecimento são superiores e as consumos de energia para arrefecimento inferiores aos publicados em [5]. Pelo contrário, nos meses de julho e agosto, em que a radiação incidente na superfície inclinada a 0° é mais intensa os gastos energéticos para arrefecimento são superiores no presente trabalho. Isto, é coerente com os resultados para os ganhos solares apresentados na Tabela 16. Assim, a hipótese de que o ficheiro meteorológico usado no presente trabalho poderá ser diferente do utilizado em [5] é válida, uma vez que as diferenças encontradas nos resultados da simulação e da literatura, presentes na Figura 32, poderão ser justificadas pela radiação solar incidente nos meses de inverno ser inferior às da referência e a radiação incidente no verão ser superior. Por outro lado, o facto das cargas de iluminação serem sempre mais elevadas, principalmente nos meses de menor altura solar, indica que o edifício está a uma altitude menor e/ou que a luminosidade exterior é menor nos meses de inverno (devido à menor transmissividade da atmosfera (céu mais nebulado)). Outra razão que poderá explicar as cargas de aquecimento serem bastante inferiores na literatura são ganhos não mencionados, assim como, outras incertezas que impedem a comparação direta com a literatura, como valores de coeficientes de emissividade e absorção solar das superfícies exteriores (telhado e parede). Além destas, também as diferenças reportadas na Tabela 17 são responsáveis pela diferença de resultados.

O indicador de maior relevância é o consumo de energia anual, dado também publicado em [5]. Na Tabela 20, estão representados os resultados obtidos pelo presente trabalho para o consumo de energia anual para arrefecimento, aquecimento, iluminação, para as configurações a), b), c) e d) com janela de vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade, sendo estes comparados com os publicados em [5]. Deve-se salientar que os valores de referência foram obtidos de um gráfico por estimativa, em que os resultados estavam apresentados em kWh/m^3 e multiplicados pelo respetivo volume da configuração, havendo uma incerteza associada. A incerteza tem maior peso no consumo de energia para aquecimento e iluminação, em que os valores são mais baixos.

Com a análise da Figura 32, é esperado que as cargas de arrefecimento anuais para todas as configurações sejam significativamente menores do que as da literatura e que as cargas de aquecimento sejam superiores, assim como as de iluminação.

Pela Tabela 19, verifica-se que os resultados obtidos para o consumo de energia arrefecimento são de facto sempre inferiores aos publicados em [5]. Como seria de esperar, o consumo de energia para arrefecimento, em cada uma das configurações, são tanto maiores quanto maiores os ganhos solares que a janela recebe, uma vez que as restantes fontes de calores se mantêm praticamente constantes. Deste modo, constata-se que o consumo de energia para arrefecimento na mesma configuração é superior com janela de vidro duplo, devido à sua maior transmissividade. Além disso, é possível verificar que a configuração c) é a que representa necessidades de energia superior de arrefecimento (2286 kWh, sendo esta inclinação a que permite ganhos solares anuais mais elevados (1007 kWh/(m² – janela) para a janela de vidro duplo com baixa emissividade e 1372 kWh/(m² – janela)). Confirma-se também que a configuração d) tem um consumo de energia para arrefecimento mais elevado 136 kWh do que aquele que tem a configuração b) com janela de vidro dupla, ao contrário dos resultados disponíveis em [5] (proporcional aos ganhos solares). Quanto ao consumo de energia para aquecimento, sabe-se que este ocorre no inverno e, sendo superior ao início e fim do dia, quando as temperaturas são mais baixas e os ganhos solares menores. Como durante a noite não há aquecimento, a temperatura no interior no início do horário de trabalho (7h) do edifício depende da temperatura do ambiente exterior durante a noite. Apesar das diferenças de volume entre os diferentes modelos, às 7h os diferentes modelos assumem temperaturas interiores muito próximas. Deste modo, devido à maior massa térmica dos modelos com volume maior (60° - 103,3 m³; 30° - 85 m³; 0° e 90° - 60 m³), estes necessitam de maiores cargas de aquecimento ao início do dia de trabalho, sendo esta uma das razões para as diferenças existentes entre o gasto de energia para aquecimento nas diferentes configurações. Para além disso, sendo os ganhos solares inferiores aos do modelo publicado [5], os superiores consumos de energia para aquecimento eram já esperado. Assim, conclui-se que caso os volumes das diferentes configurações fossem iguais, a configuração que provocaria mais necessidades energéticas de arrefecimento seria a configuração d), seguida da configuração a) e c), com necessidades semelhantes, e, por fim, a configuração b). No entanto, a configuração b), devido ao volume bastante superior (quase o dobro) ao das configurações a) e d), possui necessidades de aquecimento superiores (768,6 kWh), sendo que a massa térmica e as temperaturas exteriores têm um peso superior nos resultados do presente trabalho do que nos resultados publicados, uma vez que no presente trabalho, a radiação solar incidente nas janelas no inverno foi superior. Apesar disso, os resultados publicados para o consumo de energia para aquecimento são inferiores (por exemplo, para a configuração b) com janela de vidro duplo, o consumo de energia para aquecimento é 319 kWh superior neste trabalho, revelando que a temperatura ambiente exterior no inverno no modelo publicado [5] foi superior à do modelo do presente trabalho. Na literatura, embora as cargas de aquecimento da configuração b) sejam superiores às da configuração a) e c), a configuração d) foi a que teve consumos de energia para aquecimento superiores. Quanto às cargas de iluminação, espera-se que estas sejam tanto maiores, quanto menor for a luminosidade que a janela permite entrar. A luminosidade depende da radiação visível que entra, esperando-se, portanto, uma relação inversa entre os ganhos solares e as necessidades de iluminação. Para além disso, a área das paredes interiores tem uma relação direta com as necessidades de iluminação (90° e 60° - 94 m²; 30° - 116,85 m²; 60° - 135,66 m²). Esta influência da área das paredes não é tão significativa como a influência da diferença de volume nas cargas de aquecimento. Assim, a configuração c) tem menores necessidades de iluminação, seguido da configuração d), e pelas configurações a) e b).

Tabela 19 – Consumo anual de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total para a janela de vidro duplo e vidro duplo de baixa emissividade para as configurações a), b), c) e d)

Tipo de vidro	Configuração	Tipo de carga	Resultados publicados (kWh) [5]	Resultados obtidos (kWh)	Desvio (kWh)
Vidro duplo	a)	Arrefecimento	2430	1874	-556
		Aquecimento	360	679	319
		Iluminação	210,0	218	8
		Total	3000	2771	-229
	b)	Arrefecimento	3461	2370	-1091
		Aquecimento	413	769	355
		Iluminação	155	217	62
		Total	4029	3356	-673
	c)	Arrefecimento	3953	2644	-1308
		Aquecimento	383	713	330
		Iluminação	85	138	53
		Total	4420	3495	-925
	d)	Arrefecimento	3390	2506	-884
		Aquecimento	480	743	26
		Iluminação	30	145	115
		Total	3900	3394	-506
Vidro duplo com baixa emissividade	a)	Arrefecimento	2160	1730	-430
		Aquecimento	390	717	327
		Iluminação	240	230	-10
		Total	2790	2677	-113
	b)	Arrefecimento	2944	2084	-860
		Aquecimento	413	846	432
		Iluminação	207	230	23
		Total	3564	3159	-405
	c)	Arrefecimento	3315	2286	-1030
		Aquecimento	425	778	353
		Iluminação	85	144	59
		Total	3825	3207	-618
	d)	Arrefecimento	2700	2183	-517
		Aquecimento	510	781	271
		Iluminação	30	152	122
		Total	3240	3116	-124

5.2 Análise dos resultados das simulações

Nesta secção, irão ser apresentados e discutidos os resultados obtidos com o modelo validado. Sendo o objetivo do trabalho estudar o efeito das diferentes estratégias de controlo para janelas inteligentes na redução do consumo energético do modelo, espera-se que os resultados obtidos provem o benefício das janelas inteligentes na redução da energia gasta em arrefecimento, provocando o aumento das necessidades de aquecimento e das necessidades de iluminação. Por esse motivo, a análise do efeito das diferentes estratégias de controlo da janela inteligente foi feita para um edifício localizado em Palermo, cidade com verões quentes que provocam elevados consumos de energia para arrefecimento.

De modo a avaliar o efeito das diferentes estratégias foram feitas 8 simulações diferentes (1 com janela de vidro dupla, 1 com janela de vidro duplo *low-E* e 6 com janela electrocromática correspondentes às 6 estratégias de controlo) para cada uma das configurações do modelo, resultando num total de 48 simulações. Para cada um dos modelos foram compilados os resultados mensais e anuais relativos aos consumos de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação do modelo.

Espera-se que quanto maior for a radiação incidente no plano da janela, maiores diferenças existirão entre os resultados. Para testar este resultado, foram também compilados os valores para a radiação mensal média horária incidente ($\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) para cada um dos planos da janela. Nesse sentido, a configuração onde se registará melhores resultados será aquela cuja radiação incidente é superior nos meses de arrefecimento e menor nos meses de aquecimento.

5.2.1 Resultados das simulações para a configuração a) do escritório

A configuração a), como mostra a Figura 21, tem a janela orientada para sul com inclinação de 90° . Com esta configuração existe já uma estratégia passiva de controlo solar, uma vez que tem uma porção de ganhos no inverno, por vezes, superiores aos ganhos solares no verão. Por essa razão, o potencial de redução das cargas térmicas no verão é menor do que para as outras inclinações. Na Figura 33, está representada a média mensal horária de radiação incidente no plano vertical. Nos meses de aquecimento, a intensidade de radiação no plano vertical é, geralmente, superior à dos meses de arrefecimento. Por esta razão os limites, I_1 e I_2 , escolhidos para a estratégia de controlo 2 e 3 foram superiores à radiação média mensal horária como se vê na Figura 33.

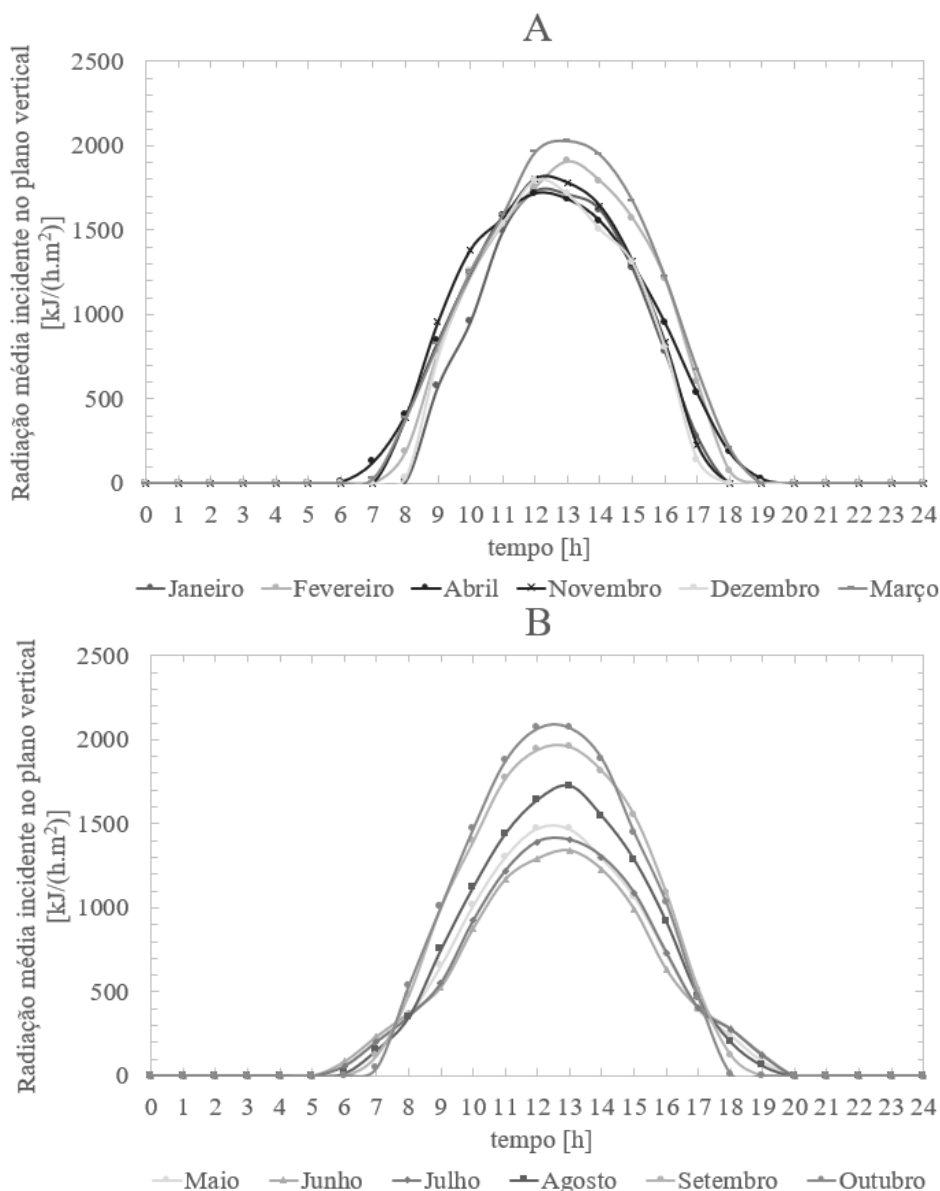


Figura 33 –Radiação média mensal horária incidente no plano vertical (A – meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).

Por outro lado, a estratégia de controlo 4 (parâmetro de controlo: radiação incidente no plano horizontal) permite uma melhor diferenciação entre o comportamento nos meses de arrefecimento e o comportamento nos meses de aquecimento. Na Figura 34, está representada a média mensal de intensidade de radiação incidente horária no plano horizontal. Como se vê, a radiação incidente nos meses de aquecimento é muito inferior (principalmente nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro) à radiação incidente nos meses de arrefecimento (principalmente nos meses de maio, junho, julho e agosto). Por exemplo, no mês de dezembro a radiação média incidente máxima é inferior a 1200 kJ/(h.m²), enquanto que para o mês de junho a radiação média incidente máxima ultrapassa 3100 kJ/(h.m²). Pela Figura 33, verifica-se ainda que a radiação média incidente fora do horário de ocupação (00 h-7 h e 18 h-24 h) é significativa apenas nos meses de arrefecimento, sendo, portanto, um bom critério, manter a janela no modo escuro fora do horário de trabalho (critério seguido nas estratégias de controlo 1 a 5).

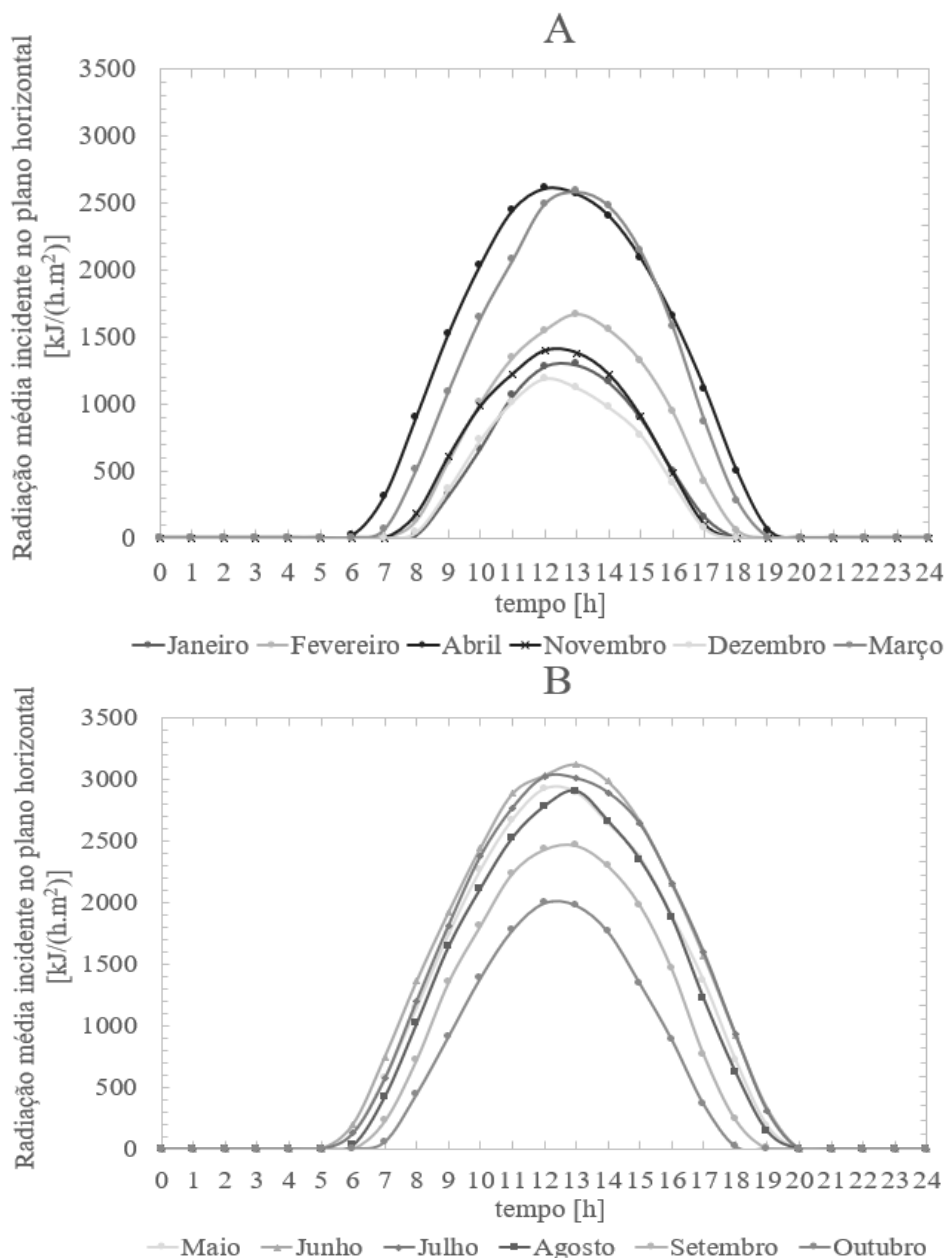


Figura 34 – Radiação média mensal horária incidente no plano horizontal (A - meses de aquecimento; B - meses de arrefecimento).

5.2.1.1 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração a)

Na Figura 35 estão representados os consumos de energia para arrefecimento para os diferentes casos estudados. Espera-se que as cargas de arrefecimento para manter a temperatura interior inferior a 22,5°C, siga a evolução da temperatura ambiente durante o horário do trabalho, uma vez que os ganhos solares são baixos. Os ganhos anuais com janela de vidro duplo foram inferiores por mais de 300 kWh/m² quando comparado com os ganhos anuais obtidos pela mesma janela com as inclinações de 0°, 30° e 60°, como se mostra na Tabela 16. Analisando a Figura 35, pode-se notar que a energia necessária para manter a temperatura abaixo da temperatura máxima de conforto (22,5°C) com a janela electrocromática difere mais dos resultados da janela de vidro duplo nos meses de setembro e outubro. Durante estes meses, a radiação média incidente na superfície do envidraçado é mais elevada, atingindo uma radiação média máxima a rondar os 2000 kJ/(h.m²), enquanto que em

junho não ultrapassa $1500 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Nota-se também que as diferentes estratégias de controlo influenciam a carga de arrefecimento, de forma menos significativa. A maior diferença entre as estratégias de controlo ocorre nos meses de julho e agosto, quando a EC6 e EC2 provocam consumos mensais cerca de 25 kWh e 15 kWh /mês menores do que a EC1, respetivamente. No entanto, os limites I_1 e I_2 (ver Figura 23) raramente foram ultrapassados nestes meses (radiação média incidente máxima cerca de $1000 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ menor do que I_1). Consequentemente, a EC 2 comanda a janela para o modo transparente, enquanto a EC 1 comanda a janela para o modo intermédio. Isto mostra que o ganho solar da janela no modo transparente é inferior à soma do ganho solar da janela no modo intermédio com os ganhos internos extra devido à maior necessidade de iluminação.

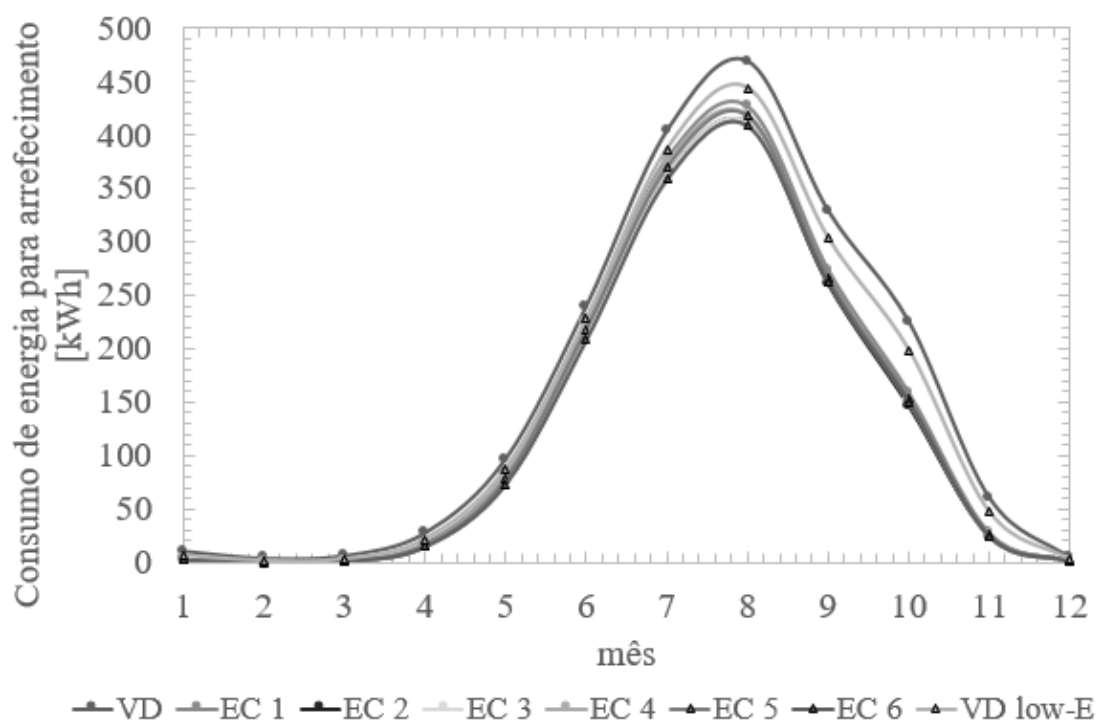


Figura 35 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 90° .

Também era expectável que a EC4 possibilitasse cargas de arrefecimento menores nos meses de arrefecimento. Entretanto, na mesma forma a necessidade de iluminação provoca ganhos térmicos superiores à redução dos ganhos solares provocada pela mudança do envidraçado electrocromático para um estado mais escuro. No mesmo sentido, podemos concluir que caso a iluminação estivesse sempre ligada, haveria uma diferença maior entre as cargas de arrefecimento com vidro duplo e as cargas de arrefecimento com envidraçado electrocromático. Consequentemente, não é surpreendente que a estratégia de controlo 6, que tem o objetivo de minimizar as cargas de iluminação, seja a que tem cargas de arrefecimento menores.

De salientar que a estratégia de controlo 5, com um consumo de energia anual para arrefecimento de 1549 kWh , apresenta melhores resultados do que a estratégia de controlo 4, que tem um consumo anual de 1561 kWh . Apesar disso, é possível concluir que a estratégia de controlo 4 provoca ganhos solares menores do que a estratégia de controlo 5, uma vez que nos meses em que os ganhos solares são superiores (setembro e outubro) a EC4 provoca necessidades de energia para arrefecimento 3 kWh menores do que a EC5.

5.2.1.2 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração a)

A Figura 36 representa a quantidade de energia necessária para manter a temperatura no interior do edifício superior a 21,5°C, utilizando as diferentes estratégias de controlo.

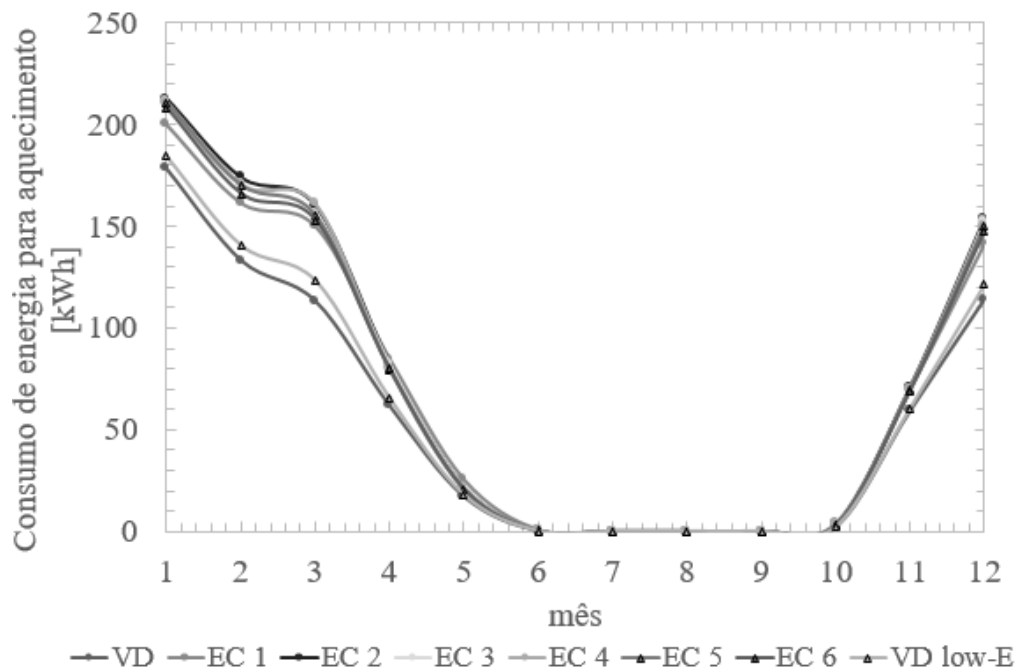


Figura 36 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 90°.

Como era de esperar, os maiores consumos ocorreram de janeiro a março, enquanto que entre junho e outubro não existem necessidades de aquecimento. Uma comparação rápida dos resultados obtidos permite afirmar que a energia consumida em aquecimento com a janela electrocromática é sempre superior às da janela de vidro duplo *low-E* e de vidro duplo convencional, mostrando uma influência direta da transmissividade da respetiva janela. Tal como para as cargas de arrefecimento, a maior diferença entre os resultados da janela electrocromática e os resultados da janela de vidro duplo ocorre nos meses com radiação média incidente mais alta, março e fevereiro (ver Figura 33-A).

A EC1 (carga anual de 837 kWh) resultou em menores cargas de aquecimento nos meses de inverno (janeiro, fevereiro, março e dezembro), apresentando gastos mensais menores por cerca 5 kWh relativamente às outras estratégias. Para meses com baixas cargas de aquecimento o desempenho desta estratégia já não é tão bom, sendo aliás, a pior estratégia em abril, maio e outubro. Por outro lado, a EC6 mantém em todos os meses de aquecimento, cargas de aquecimento baixas (carga anual de 848 kWh) relativamente às outras estratégias de controlo.

Ao contrário do que acontece com os consumos de energia para arrefecimento, o critério pela radiação incidente na horizontal (EC4) tem melhores resultados anuais por 13 kWh do que o critério pela radiação incidente na vertical (EC2). A EC4 tem como critério a radiação incidente no plano horizontal. Nos meses de inverno a radiação média mensal horária incidente máxima no plano horizontal é inferior a 1500 kJ/(h.m²). Por outro lado a EC2 tem como critério a radiação incidente no plano vertical. No plano vertical, a radiação média mensal horária incidente máxima é sempre superior a 1700 kJ/(h.m²). Como os limites de radiação incidente estabelecidos para a mudança de estado são os mesmos para as duas estratégias de controlo, conclui-se que a EC2 irá comandar durante mais tempo a janela

electrocromática para estados mais escuros. Deste modo, nestes meses a EC2 resultará em ganhos solares menores e em necessidades de energia para aquecimento mais elevadas. Como isto acontecer significa que a radiação incidente na janela é elevada, mesmo que resulte em necessidades de iluminação maiores e por consequente cargas caloríficas, a redução de ganhos solares é superior ao aumento dos ganhos internos e como tal há mais necessidades de aquecimento.

Analisando a Figura 36, também se pode verificar que as cargas de aquecimento com EC3 são inferiores às de EC2, perfazendo uma diferença anual de 11 kWh, e que as cargas de aquecimento com EC5 são inferiores em 6 kWh às de EC4. Esta diferença entre as cargas de aquecimento de EC2 e EC3 são tanto maiores quanto mais tempo a EC2 comandar o vidro electrocromático para estados mais escuros. Devido à evolução da radiação média incidente no plano vertical, se num determinado momento do dia a radiação incide com uma intensidade superior a $2400 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$, a EC2 e a EC3 irão comandar a janela para o estado intermédio durante o mesmo tempo em que a radiação é superior a $2400 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$. No entanto, com a EC2 a janela estará no estado intermédio enquanto a radiação é superior a $2400 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$. Por outro lado, com a EC3 a janela estará no estado intermédio em momento do dia que a radiação incidente é inferior a $2400 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$. Deste modo, a EC3 tem ganhos solares superiores, provocando necessidades de aquecimento inferiores. O mesmo acontece com EC5 em relação a EC4. No entanto, como nestes meses a radiação média incidente máxima no plano horizontal é cerca de $200 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$ menor do que no plano vertical, a janela electrocromática muda para o estado transparente, havendo menores diferenças entre o EC4 e o EC5 do que entre o EC2 e o EC3.

5.2.1.3 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação da configuração a)

Na Figura 37 estão representadas as necessidades de energia para iluminação da configuração a). Como era esperado, o uso de janelas de vidro duplo e vidro duplo *low-E* resultaram em cargas de iluminação menores ao longo do ano inteiro, uma vez que têm uma transmissividade à radiação visível de 0,817 para a janela de vidro duplo e 0,769 para a janela de vidro duplo *low-E*. Ao contrário do que acontece com as cargas de arrefecimento e aquecimento, o maior desvio entre as necessidades de iluminação quando se utiliza uma janela de vidro duplo e uma janela electrocromática (EC6) ocorre para os meses de maio (diferença de 16,1 kWh), junho (diferença de 16,6 kWh) e julho (diferença de 14,7 kWh), em que a radiação média incidente é sempre inferior a $1400 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$, devido à menor transmissividade da janela electrocromática (mesmo no estado transparente) provocar um aumento das necessidades de iluminação. Por exemplo, no mês de janeiro o modelo com janela electrocromática controlada pela EC6 tem necessidades de iluminação de 40,9 kWh, 10,7 kWh superiores ao mês de julho. No entanto, em junho a EC6 resulta em consumos de energia para iluminação de 30,2 kWh, que, embora seja uma diminuição de consumo de energia relativamente ao mês de janeiro, representa uma diferença de 16,6 kWh quando comparado com a janela de vidro duplo para o mesmo mês. Para o mesmo mês esta representa um aumento de apenas 11 kWh.

A estratégia de controlo 6, que tinha o objetivo de minimizar as cargas de iluminação, é a estratégia que, de facto, permite menores consumos. Mesmo assim o consumo anual para iluminação calculado foi de 360 kWh, cerca de 142 kWh superior às da janela de vidro duplo. Durante os meses de verão, a EC2 e EC3 manteve a janela no estado transparente. Por isso, a energia para iluminação foi igual ao da EC6 entre abril e agosto. O mesmo aconteceu com a EC4 e EC5 entre novembro e fevereiro.

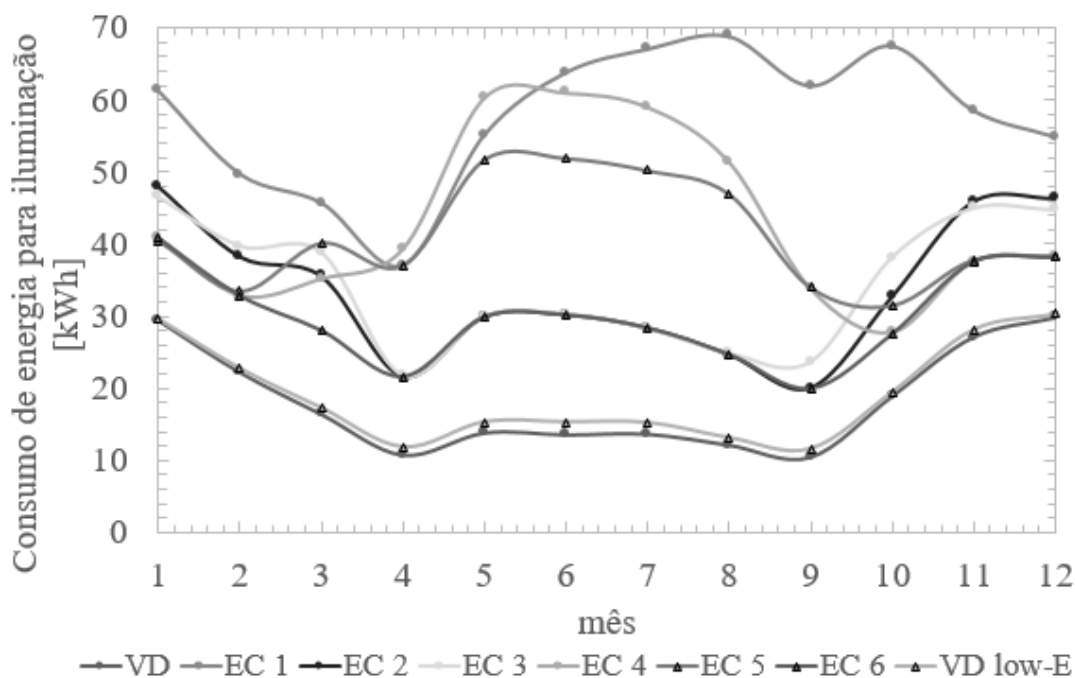


Figura 37 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 90°.

A EC 1 é a estratégia que resultou em consumos para iluminação mais elevados, totalizando 691 kWh anuais (quase o dobro de EC6). De facto, as estratégias de controlo EC 4, EC 5 e EC 1 comandam o envidraçado para um estado menos transparente, durante os meses de arrefecimento, com o objetivo de diminuir as cargas de arrefecimento. No entanto, como foi dito na secção 5.2.1.1 (ver também a Figura 37), estas provocam um grande aumento das cargas mensais de iluminação. Como a radiação média incidente é baixa, o aumento das cargas térmicas devido à iluminação, superioriza-se à redução dos ganhos solares. As maiores diferenças entre os resultados da EC1 e EC6 ocorre para os meses de julho e agosto, em que estas ultrapassam os 40 kWh mensais.

A estratégia de controlo 5 permite menores cargas de iluminação do que a EC4, durante os meses de arrefecimento (principalmente maio, junho e julho). Estes resultados podem ser explicados pela previsão de 2 h do critério da radiação. Esta previsão faz com que o envidraçado mude para um estado mais escuro 2 h mais cedo, mudando também para o estado transparente 2 h mais cedo. Isto permite que a janela esteja no estado transparente em alturas do dia em que a luminosidade é suficiente para que não haja necessidades de iluminação. A redução de ganhos solares é praticamente a mesma, no entanto a EC4 resultou em cargas para iluminação superiores.

5.2.1.4 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração a)

A Figura 38 mostra o consumo total da energia pelo edifício com configuração a) ao longo do ano para a janela de vidro duplo, vidro duplo *low-E* e para a janela electrocromática utilizando as 6 estratégias de controlo diferentes. Na primeira análise pode-se constatar que a janela com vidro duplo resultou em consumos de energia mais baixos para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril e dezembro. No mês de maio, os melhores resultados foram obtidos pela janela de vidro duplo *low-E* e no mês de setembro pela EC2. Nos restantes meses a EC6 apresenta os melhores resultados.

No mês de setembro a estratégia de controlo que resulta em necessidades de energia total menores (281 kWh) é a estratégia de controlo cujo critério é a radiação instantânea incidente na janela. Este mês caracteriza-se por uma radiação média horária incidente máxima de cerca de 1960 kJ/(h.m²). Este resultado é importante, uma vez que é o único mês em que a EC2 resulta em consumos menores do que EC6. No mês de outubro a radiação média incidente é ligeiramente superior à do mês de setembro apresentando valores sempre inferiores a 2073 kJ/(h.m²) provocando cargas de iluminação superiores (5,2 kWh em relação a EC6) por a janela apresentar mais frequentemente estados escuros, desvalorizando desse modo a redução das necessidades de arrefecimento (3,4 kWh em relação a EC6).

De salientar que a estratégia de controlo 4 e 5 durante os meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro apresentam resultados muito próximos dos da EC6 (diferenças inferiores a 5%). O mesmo acontece com a EC 2 e EC 3 entre abril a setembro (diferenças inferiores a 2%). Na verdade, as estratégias de controlo que permitem menores cargas de iluminação são as que também permitem menores cargas totais. Para configuração a), é preferível a janela se apresentar no estado transparente sem haver necessidades de iluminação do que num estado mais escuro que aumenta as necessidades de iluminação. Obviamente, esta conclusão poderia ser diferente, caso se utilizasse um tipo diferente de iluminação. Eventualmente, a aplicação de lâmpadas a LED poderia diminuir os consumos de energia para iluminação e diminuir o peso da estratégia de controlo da janela electrocromática nestes consumos.

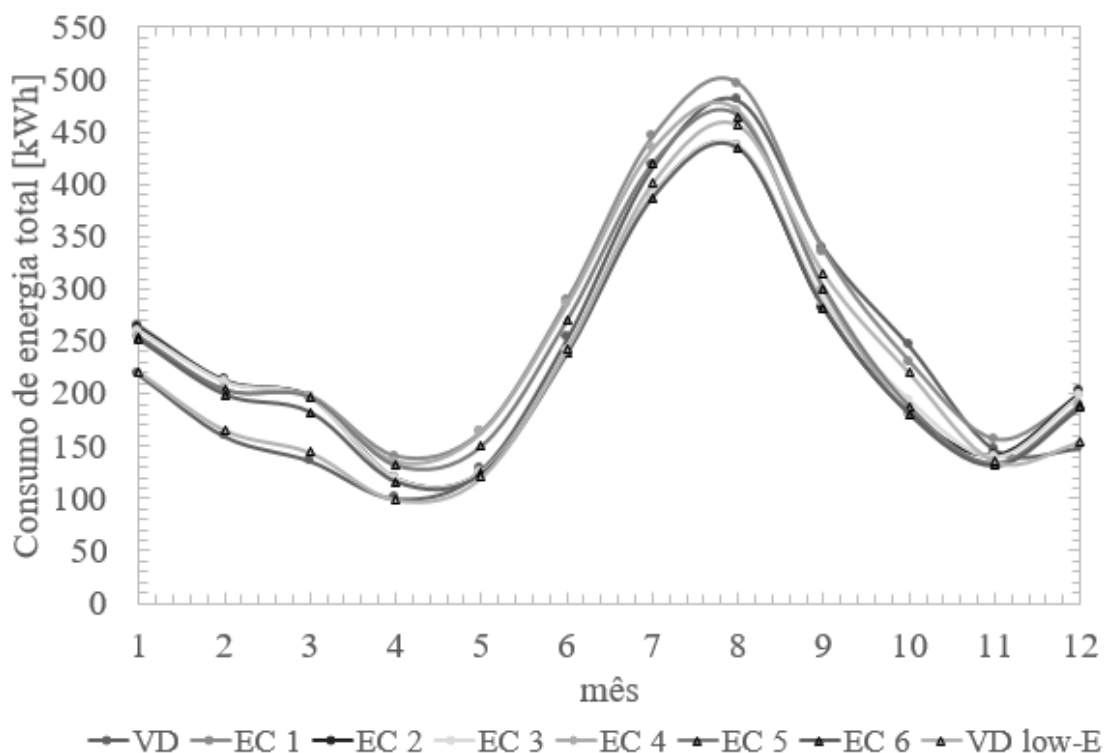


Figura 38 – Necessidade de energia ao longo do ano com a janela orientada a sul com inclinação de 90°.

Para analisar o desempenho anual das estratégias de controlo numa forma global estão apresentadas as cargas anuais calculadas na Tabela 20 para cada estratégia de controlo, assim como da janela de vidro duplo e da janela de vidro duplo *low-E*.

Como se pode notar, a EC6 é a única estratégia que permite uma carga anual total mais baixa do que a janela de vidro duplo (2771 kWh), apresentando uma poupança energética anual de 58 kWh. No entanto, a janela de vidro duplo *low-E* permite cargas anuais totais ainda menores (2677 kWh). A EC1 é a que provoca cargas totais anuais mais altas (3126 kWh), apesar de

permitir as cargas de aquecimento mais baixas (837 kWh). No entanto, as cargas de aquecimento mais baixas devem-se a ganhos internos superiores devido às lâmpadas.

Tabela 20 – Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação com janela orientada para sul e com inclinação de 90°

Janela	Arrefecimento (kWh)	Aquecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)
VD	1874	679	218	2771
VD <i>low</i> - E	1730	717	230	2677
EC1	1598	837	691	3126
EC2	1510	879	402	2790
EC3	1519	868	411	2799
EC4	1561	866	517	2944
EC5	1549	860	493	2902
EC6	1505	848	360	2713

5.2.2 Resultados das simulações para a configuração b) do escritório

A configuração do escritório com janela orientada para sul e com inclinação de 60° (configuração b) – Figura 21) tem um volume superior ao anterior e como tal uma massa térmica superior também, o que poderá influenciar os resultados para as diferentes estratégias de controlo. A inclinação de 60° do plano da janela permitirá ganhos solares superiores aos da configuração a), uma vez que a radiação incidente será mais intensa durante grande parte do ano. Na Figura 39, está representada a radiação média mensal horária incidente no plano da janela. Como pode ser visto nas figuras, a radiação média incidente tem evoluções semelhantes ao longo do dia para a maioria dos meses do ano, atingindo um valor máximo geralmente entre 2600 e 2800 kJ/(h.m²). Por exemplo, no mês de setembro foi registado o valor máximo de 2742 kJ/(h.m²) para radiação média incidente. No entanto, para os meses de novembro, dezembro e janeiro isso não acontece, sendo, portanto, a radiação média incidente sempre inferior a 2200 kJ/(h.m²). Como os ganhos solares no verão são maiores, o potencial de redução das cargas de arrefecimento é também maior. Apesar de tudo, como a radiação média incidente no inverno também é elevada, é esperado um grande aumento das cargas de aquecimento em relação ao vidro duplo.

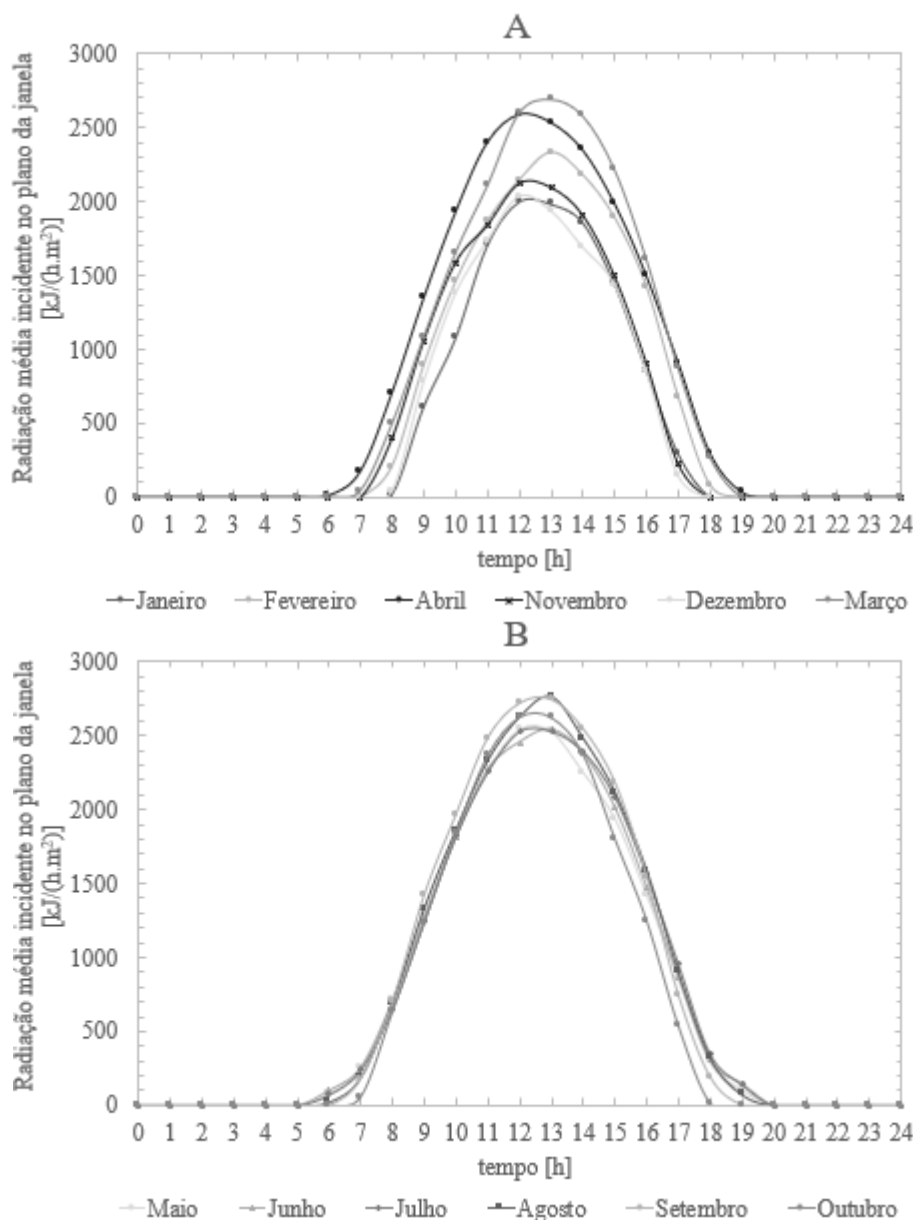


Figura 39 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B - meses de arrefecimento).

5.2.2.1 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração b)

De modo a comparar o efeito das diversas estratégias de controlo no comando duma janela electrocromática inclinada a 60° estão representados na Figura 40 os consumos de energia para arrefecimento ao longo do ano.

Comparando a Figura 40 com a Figura 35, repara-se que os consumos de energia para arrefecimento na configuração b) com a janela electrocromática sofreram uma redução bastante mais significativa em relação aos resultados com vidro duplo do que na configuração a), confirmando o maior potencial de redução dos gastos energia para arrefecimento. No mês de julho, a janela electrocromática resultou numa redução de 142 kWh na configuração b), enquanto que na configuração a) apenas reduziu 44,5 kWh de gastos de energia com arrefecimento. Pode-se constatar também que embora o consumo de energia para arrefecimento com a janela de vidro duplo e vidro *low-E* sejam superiores às da Figura 35, as cargas de arrefecimento nos modelos com janela electrocromática foram semelhantes.

A EC1 que, não havendo aquecimento, mantém a janela no estado intermédio, durante o horário de ocupação, é a estratégia de controlo que permite a maior redução das cargas de arrefecimento (961 kWh/ano). A EC6, pelo contrário, é a estratégia de controlo que permite menores reduções das cargas de arrefecimento (793 kWh/ano).

A EC2 resultou numa redução das necessidades de arrefecimento nos meses de abril (0,3 kWh), setembro (8,6 kWh), outubro (18,2 kWh) e novembro (6,3 kWh) relativamente aos gastos energéticos para arrefecimento da EC4. Isto acontece, uma vez que nestes meses a radiação incidente no plano da janela (critério da EC2) ultrapassou com mais frequência os limites I_1 e I_2 do que a radiação incidente no plano horizontal (EC4). Desta forma, a janela apresentou o estado mais escuro com EC2 durante períodos de tempo mais longos. O contrário acontece nos meses de maio a agosto. Por exemplo, em junho a EC4 resultou numa poupança energética de 14,1 kWh em relação a EC2.

A EC5 resulta num ligeiro aumento dos ganhos solares relativamente a EC4, resultando num aumento do consumo anual para arrefecimento de 18 kWh. O mesmo acontece com EC3 em relação a EC2, sendo o aumento de 18,2 kWh.

Assim, para configuração b) as cargas de arrefecimento são tanto menores quanto menor for a transmissividade da janela. Neste caso, como a radiação incidente é bastante alta durante os meses de arrefecimento, e a redução dos ganhos solares é proporcional à redução da transmissividade da janela e à radiação incidente, a redução dos ganhos solares é superior aos ganhos internos devido ao aumento das cargas de iluminação.

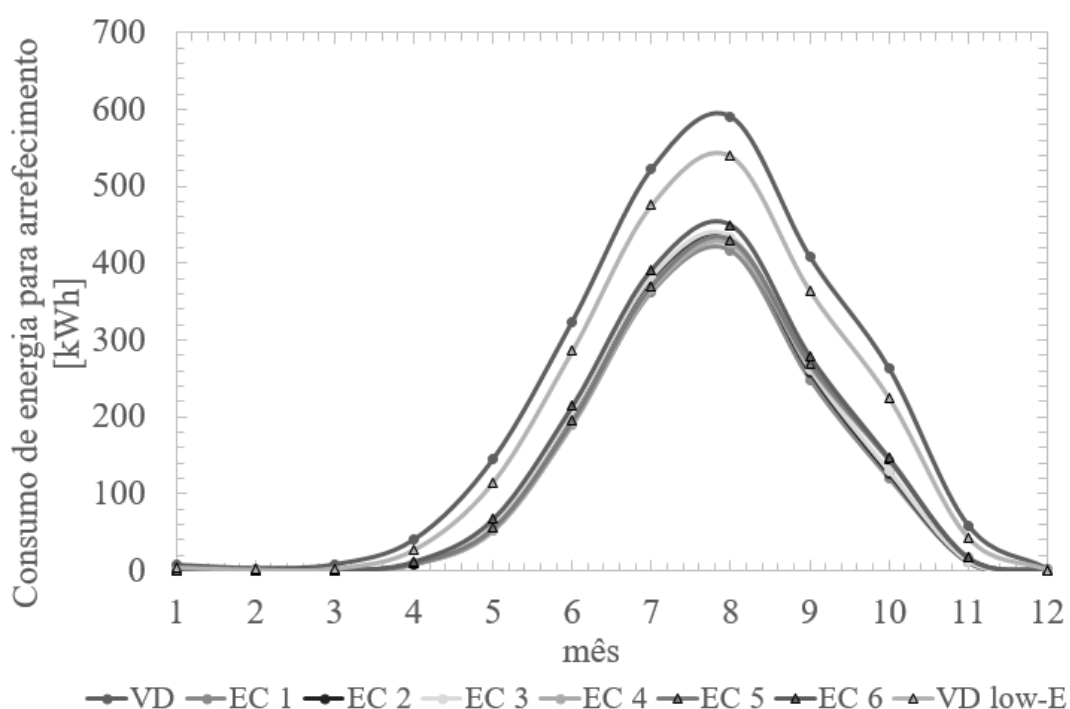


Figura 40 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.

5.2.2.2 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento da configuração b)

Na Figura 41 encontram-se representados os gastos energéticos simulados para aquecimento do escritório com configuração b) ao longo do ano para as janelas de vidro duplo, de vidro duplo *low-E* e as 6 estratégias de controlo de envidraçado electrocromático. Como a massa térmica desta configuração é superior à da configuração a) seriam de esperar cargas de aquecimento superiores. No entanto, os ganhos solares nos meses de aquecimento são também superiores.

Os resultados apresentados na figura mostram um ligeiro aumento das cargas de aquecimento relativamente às cargas de aquecimento da configuração a). Por exemplo, apesar de em janeiro a radiação média incidente na janela da configuração b) ser superior à da configuração a), para o vidro duplo o consumo de energia para aquecimento foi 30 kWh maior que o da configuração a) com a mesma janela. Isto deve-se ao aumento da massa térmica o que resulta em necessidades de energia para aquecimento às 7 h. De salientar também que os resultados das janelas electrocromáticas diferiram mais significativamente da janela de vidro duplo, indicando que os ganhos solares tem um peso maior nas cargas de aquecimento.

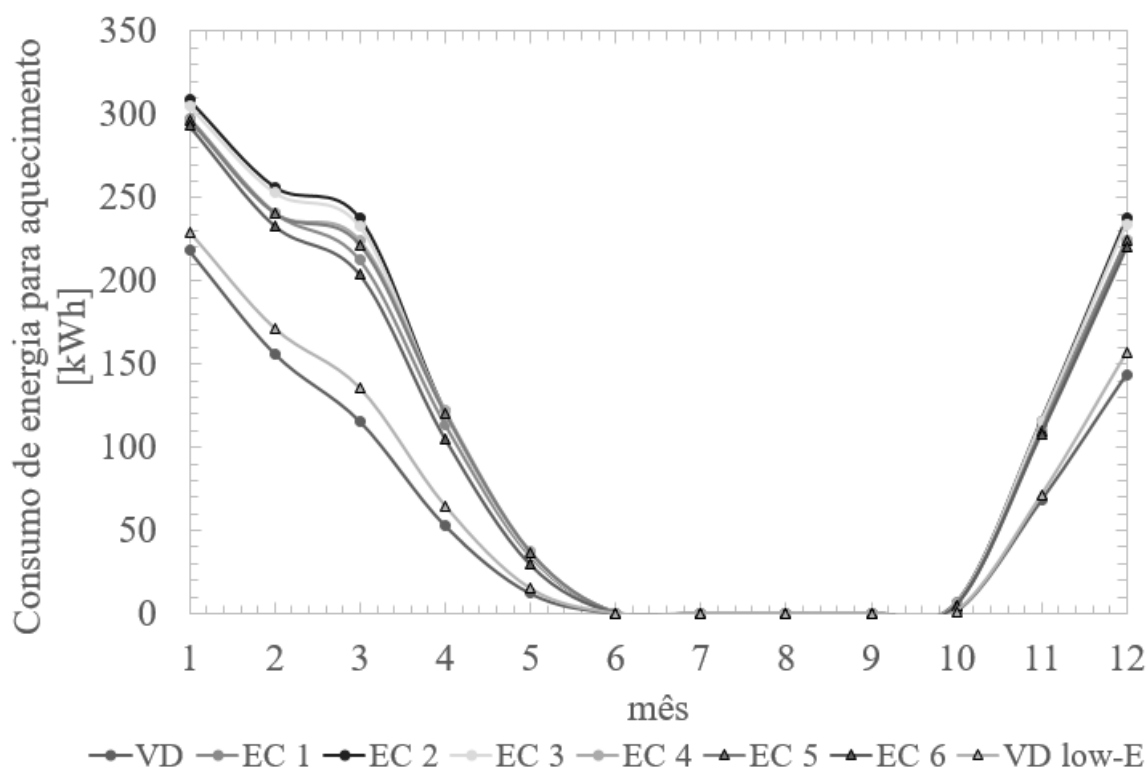


Figura 41 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.

A estratégia de controlo 6 é a que resultou em consumos de energia para aquecimento menores ao longo de todo o ano, tendo um consumo anual de 1199,4 kWh. A EC6 foi a que permitiu o melhor aproveitamento da energia solar, ao permanecer durante mais tempo no modo transparente. Do mesmo modo, nos meses de novembro, dezembro e janeiro, a EC4 e a EC5 por o limite I_1 ser poucas vezes alcançado, como mostra o facto da radiação mensal média horária incidente no plano horizontal ser sempre inferior a 1400 kJ/(h.m²), apresentam-se maioritariamente no estado mais transparente. A diferença entre as cargas mensais de aquecimento de EC4 e EC5 para estes meses e as de EC6 é sempre inferior a 4 kWh.

Também, a EC1 assume o modo transparente quando existem necessidades de aquecimento. No entanto, apresentou um consumo energético para aquecimento superior ao da EC 6, principalmente nos meses de março e abril em que a diferença foi superior a 8 kWh.

As estratégias de controlo baseadas na previsão de 2 h da radiação (EC3 e EC5) resultaram em melhores resultados do que as estratégias baseadas na radiação incidente instantânea (EC2 e EC4, respetivamente). A EC3 resultou na poupança energética anual de 16,8 kWh relativamente a EC2, enquanto que a EC5 reduziu 3,9 kWh o consumo anual de EC4. A justificação para estes resultados foi que ambas as estratégias baseadas na previsão da radiação permitem ganhos solares superiores, ao ficar no modo transparente quando a radiação incidente está acima do limite definido para mudança, até 2 horas.

A EC2 resultou em cargas de aquecimento anuais superiores 58,5 kWh às de EC4. A razão para a obtenção deste resultado foi a radiação incidente no plano da janela ser superior à radiação incidente no plano horizontal. Desse modo, a EC 2 levou a janela para um modo mais escuro com mais frequência, diminuindo os ganhos solares e aumentando as cargas de aquecimento.

5.2.2.3 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação da configuração b)

Na Figura 42 estão representados os consumos energéticos para iluminação ao longo do ano para as janelas de vidro duplo, de vidro duplo *low-E* e as 6 estratégias de controlo de vidro electrocromático da configuração b).

Embora a inclinação da janela de 60° seja a que permite maiores ganhos solares nos meses de inverno, a luminosidade média interior nesta configuração nestes meses é ligeiramente inferior à da configuração a) em que a janela tinha uma inclinação de 90° devido à maior área de superfícies interiores (Tabela 14), contribuindo para maiores cargas de iluminação. Por exemplo, em janeiro a configuração b) com janela de vidro duplo teve um consumo de energia para iluminação 3,3 kWh superior ao da configuração a) com a mesma janela.

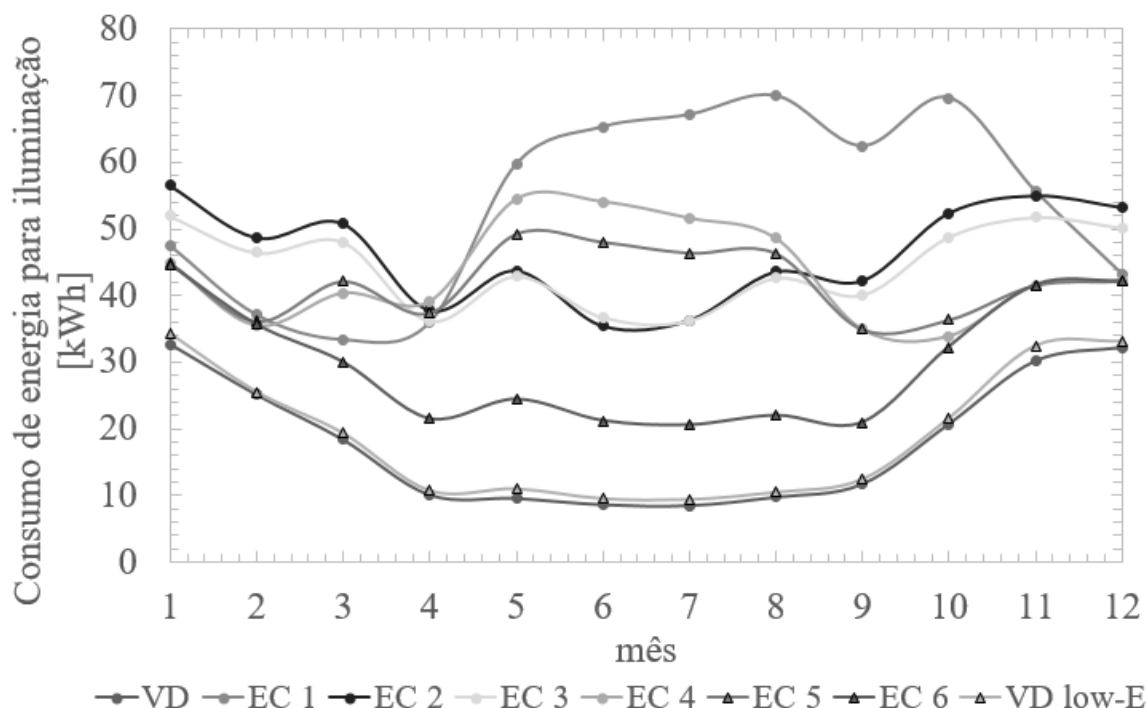


Figura 42 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.

Como seria de esperar, a janela de vidro duplo é a que permite menores cargas de iluminação uma vez que tem uma transmissividade à luz mais elevada (0,817). A diferença entre os resultados para os consumos de energia para iluminação da EC6 e os da janela de vidro duplo foram semelhantes ao longo do ano, mantendo-se cerca de 10 kWh.

A EC 6 resultou em cargas de iluminação iguais às que seriam de esperar, caso de durante o ano todo a janela electrocromática apresentar o estado transparente, uma vez que este controlo visa minimizar o uso de iluminação, levando a janela para um estado mais escuro apenas se tal não implicar necessidades de iluminação acrescidas, ou se existirem necessidades de iluminação no estado transparente e a temperatura exterior for superior a T_2 .

Nos meses de inverno as EC4 e EC5 resultaram em necessidades de energia para iluminação semelhantes a EC6 (diferenças inferiores a 0,6 kWh), uma vez que se apresentam durante a maioria do tempo no estado transparente.

A EC 1 teve consumos de energia para iluminação ligeiramente superiores às de EC6 (diferenças inferiores a 3,5 kWh), nos meses de inverno. Quanto mais tempo houver necessidades de aquecimento, menores são as diferenças nos resultados, uma vez que a janela permanece no estado transparente durante mais tempo, minimizando a necessidade de iluminação do espaço e, consequentemente, de energia gasta.

Entre maio e outubro, excetuando a EC6, todas as estratégias apresentam cargas elevadas de iluminação. Neste sentido, a EC1 destacou-se com o consumo máximo de energia para iluminação (para o mês de agosto resultou num consumo de 47,9 kWh superior ao de EC6), uma vez que manteve a janela no estado intermédio, a que apresenta cargas mais elevadas. Do mesmo modo, EC4 apresenta consumos elevados de abril a agosto (superiores a 40 kWh).

5.2.2.4 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total da configuração b)

Na Figura 43, estão representados os consumos totais de energia ao longo do ano, que no fundo, juntamente com as cargas totais anuais, são os melhores indicadores do efeito da estratégia de controlo no consumo de energia do escritório.

A janela electrocromática, independentemente da estratégia de controlo, resultou em menores cargas totais nos meses de maio (121,3 kWh com EC6), junho (235,7 kWh com EC6), julho (411,9 kWh com EC6), agosto (471,3 kWh com EC6), setembro (299,6 kWh com EC6) e outubro (183,8 kWh com EC6). Nos meses de inverno, a janela de vidro duplo foi a que levou a melhores resultados. Em abril e novembro, a janela *low-E* permitiu menores consumos energéticos.

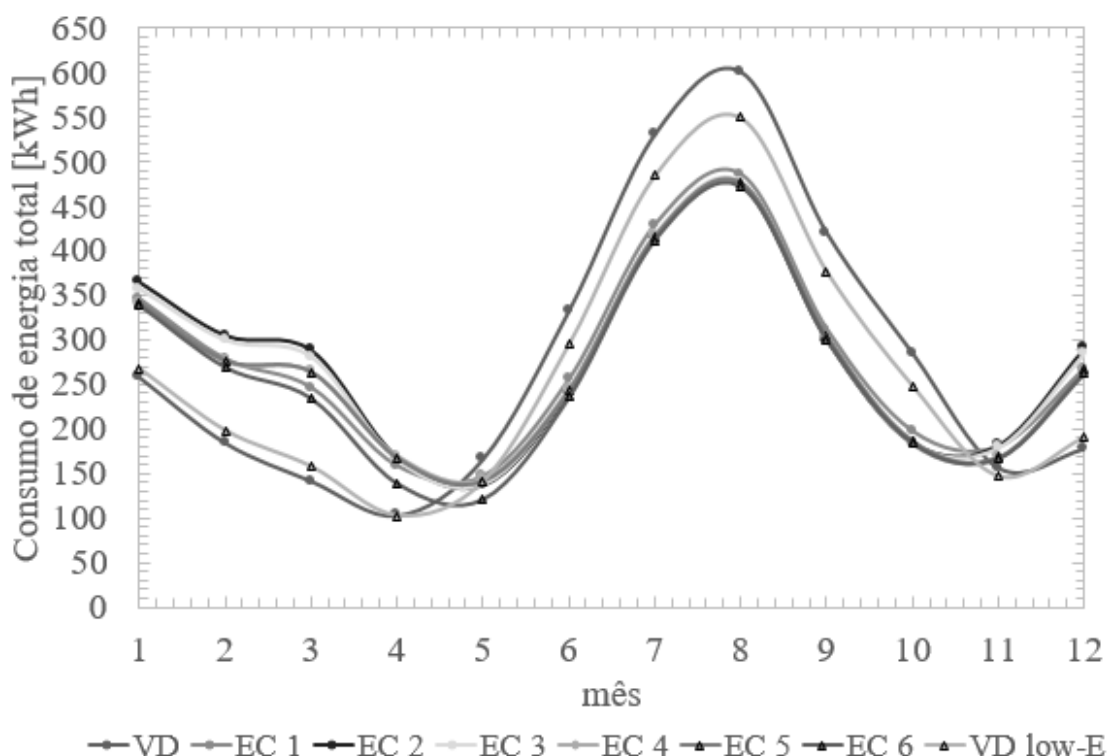


Figura 43 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 60°.

A EC6 resultou em menores cargas totais em qualquer momento do ano quando comparada com as restantes estratégias de controlo, exceto para o mês de outubro em a EC4 permitiu uma redução de 0,6 kWh em relação a EC6. As diferenças entre os resultados da EC6 e o das outras estratégias ocorreu nos meses de março, abril e maio, em que a diferença é de cerca de 30 kWh. Nos meses de verão, apesar da EC6 grande diferença nos resultados para as cargas de iluminação, os resultados para os consumos totais são mais próximos (diferença menor que 10 kWh) uma vez que a EC6 reduz em menor quantidade as cargas de arrefecimento.

A EC4 resultou em menor gastos energéticos do que a EC2 (diferença anual de 97,7 kWh), principalmente nos meses de aquecimento, mostrando que o critério pela radiação incidente na horizontal poderá ser importante no controlo da janela eletrocromática nestes meses, uma vez que permite uma boa diferenciação entre os meses de aquecimento e os meses de arrefecimento.

Na Tabela 21 estão apresentadas as cargas anuais para esta configuração, que permitirão comparar o comportamento global das estratégias de controlo. Como mostra esta tabela, a

única estratégia de controlo que resultou em menores consumos totais anuais do que a janela de vidro duplo *low-E* foi a EC6, reduzindo 26 kWh. Também se verifica que todas as estratégias de controlo permitem reduções nas cargas totais quando comparadas com a janela de vidro duplo.

Como já era esperado pela análise da Figura 43, apesar de ser a estratégia de controlo com menor redução do consumo de energia para arrefecimento, mais 168 kWh que EC1, a EC6 é a estratégia de controlo que permite à janela electrocromática um melhor desempenho global, 3133 kWh. Isto deveu-se à EC6 resultar nos consumos de energia para aquecimento e iluminação menores.

Tanto a estratégia de controlo 4 como a 5 permitem uma redução de cerca de 100 kWh quando comparados com o modelo com janela de vidro duplo. A mesma redução é possível com a EC6 em relação a estas estratégias de controlo (EC4 e EC5).

Tabela 21 - Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para sul e com inclinação de 60°

Janela	Arrefecimento (kWh)	Aquecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)
VD	2370	767	217	3356
VD <i>low-E</i>	2084	846	230	3159
EC1	1409	1243	647	3299
EC2	1478	1319	556	3352
EC3	1498	1302	532	3331
EC4	1473	1260	521	3254
EC5	1491	1256	505	3252
EC6	1577	1199	357	3133

5.2.3 Resultados das simulações para a configuração c) do escritório

Como mostra a Tabela 15, a configuração com janela inclinada a 30° é das 6 configurações aquela que obtém ganhos solares mais elevados. Para além disso, tem também uma massa térmica superior à configuração a), mas inferior à da configuração b). Na Figura 44, está representada radiação média mensal horária incidente no plano da janela.

As potências médias de radiação incidente no plano da janela são superiores nos meses de maio, junho, agosto e setembro, sendo que no pico do dia a radiação média incidente ultrapassa os 3000 kJ/(h.m²). Nos meses de inverno (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) a radiação média horária incidente máxima ronda os 2000 kJ/(h.m²), havendo assim uma diferença de 1000 kJ/(h.m²). Como a radiação média incidente no inverno é bastante menor do que nos verão, espera-se que a diminuição do consumo de energia para arrefecimento seja superior ao aumento dos gastos energéticos com aquecimento e iluminação.

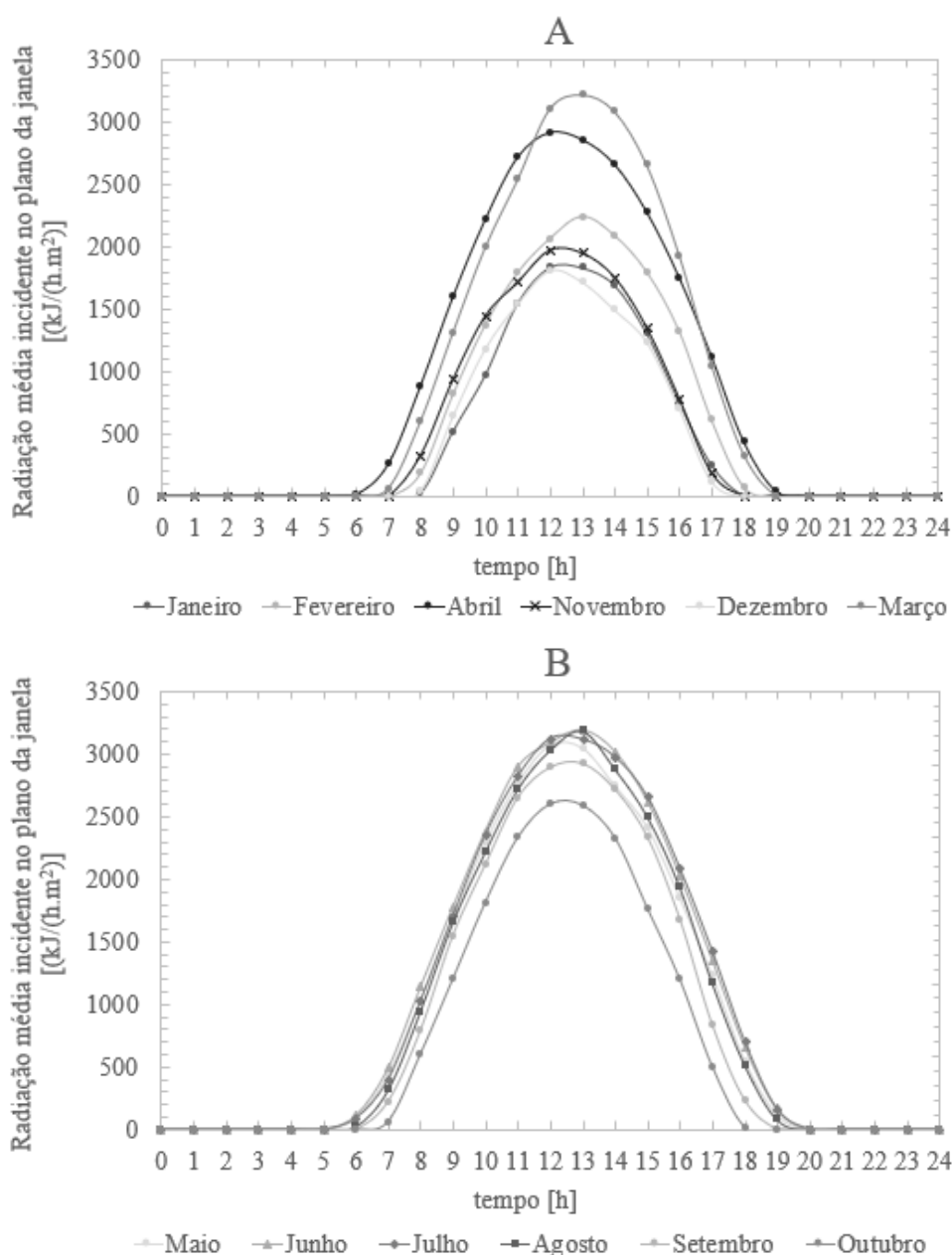


Figura 44 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).

5.2.3.1 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração c)

Uma vez que a janela inclinada a 30° tem ganhos solares mais elevados no verão, espera-se que os resultados dos gastos energéticos para arrefecimento com esta configuração acompanhem esse aumento. Os consumos de energia para arrefecimento ao longo do ano estão representados na Figura 45.

Como seria esperado as cargas de arrefecimento para a configuração f) são superiores às anteriores. As estratégias de controlo resultaram em consumos de energia próximos, estando na figura os resultados praticamente sobrepostos. De facto, a diferença máxima registada ocorreu no mês de julho em EC2 provocou a redução de 8,3 kWh. Isto indica que para esta configuração a estratégia de controlo tem pouca influência nas cargas de arrefecimento e que as diferentes estratégias de controlo levaram com grande frequência a janela para o mesmo estado. Tal como na configuração b), os resultados da janela electrocromática foram bastante

menores dos da janela de vidro duplo, tendo para o mês de julho a diferença máxima de 172,8 kWh com EC2.

Apesar das diferentes estratégias de controlo terem resultado em consumos de energia para arrefecimento próximos, é possível verificar que a EC2 e a EC4 representam as estratégias de controlo que mais reduziram as cargas de arrefecimento (EC2 reduziu mais 6 kWh do que EC4, durante o ano). A EC2 resultou num consumo anual de 1697,1 kWh, tendo registado o menor consumo de energia para este fim. Do mesmo modo, se observou que a EC3 e a EC5 exibiram uma performance ligeiramente inferior do que a EC2 e a EC4, respetivamente aumentando o consumo anual para arrefecimento em 15,4 kWh e 21,1 kWh.

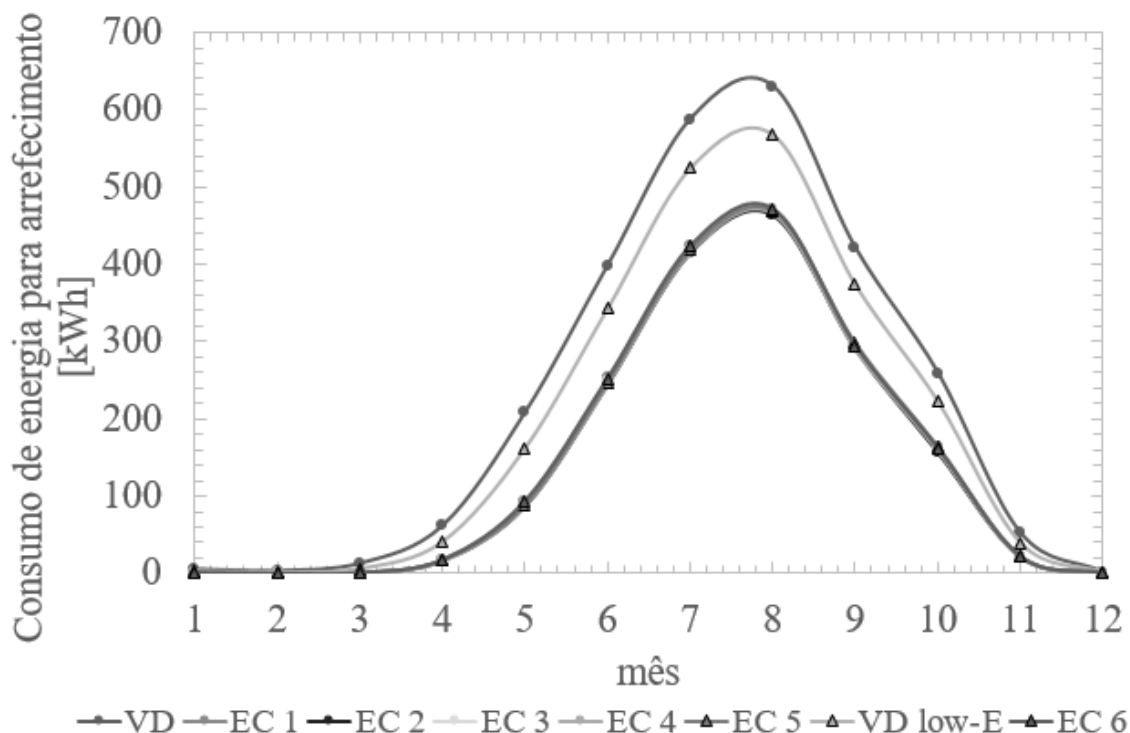


Figura 45 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 30°.

A EC6 e a EC1 são as estratégias que reduziram em menor grau os consumos energéticos para arrefecimento (consumo anual de 1737,4 kWh e 1741,4 kWh). O que indica que a EC2, EC3, EC4, EC5 permitiram menores ganhos solares do que a EC1, mesmo tendo esta levado a janela para o modo intermédio. Embora a EC6 apenas se foque na redução das cargas de arrefecimento se isso não implicar o aumento das cargas de iluminação, resultou em cargas de arrefecimento inferiores a EC1.

5.2.3.2 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração c)

A configuração c) possui uma massa térmica menor do que a configuração b), tendo ganhos solares nos meses de aquecimento semelhantes, como mostra a Figura. Por outro lado, tem uma massa térmica superior ao da configuração a) e ganhos solares superiores ao deste. Na Figura 46 estão representados os consumos de energia para aquecimento na configuração c) ao longo do ano.

Como nas configurações anteriores, a diferença entre os consumos de energia para aquecimento da janela electrocromática e os da janela de vidro duplo é proporcional aos ganhos solares (o mês de março que apresentou uma radiação média incidente superior, resultou na diferença máxima de 61,3 kWh).

A EC6 resultou no menor gasto anual de energia para aquecimento com janela electrocromática de 937,7 kWh. Como, normalmente, nos meses de inverno, em que as cargas de aquecimento são superiores, a luminosidade recomendada só é atingida com o modo transparente da janela electrocromática, a EC6 levou a janela para esse mesmo modo durante mais tempo que as outras estratégias. Para além disso, quando a luminosidade média interior com a janela no modo transparente é inferior a 450 lux, o critério da EC6 é a temperatura exterior. Como a temperatura é geralmente superior a T_2 , principalmente nos meses de inverno, o modo transparente também foi atingido durante a maioria do tempo.

A EC1 resultou num consumo anual de energia para aquecimento superior em 23,9 kWh ao de EC6. Nos meses de janeiro, dezembro e novembro, a diferença nos gastos mensais foi inferior a 2,9 kWh (janeiro). Por outro lado, no mês de março em que a diferença no consumo de energia para aquecimento entre EC6 e a janela de vidro duplo foi superior, a diferença entre EC1 e EC6 foi também 2,9 kWh. O que mostra que a diferença para a janela de vidro duplo foi superior em março porque as estratégias de controlo levam a janela para o estado intermédio ou escuro durante mais tempo.

As estratégias de controlo cujo critério se baseia na previsão de 2 h da radiação incidente resultaram novamente em consumos de energia para aquecimento inferiores às estratégias que se baseiam na radiação incidente no momento, devido a ganhos solares superiores. A EC3 resultou num gasto anual de energia para aquecimento de 8,8 kWh inferior ao de EC2, enquanto EC5 permitiu uma redução anual de 10,5 kWh para aquecimento.

Por fim, reparou-se que a EC4 permitiu melhores resultados nos meses de inverno do que o EC2, contribuindo para menor carga de aquecimento anual, em 7,4 kWh.

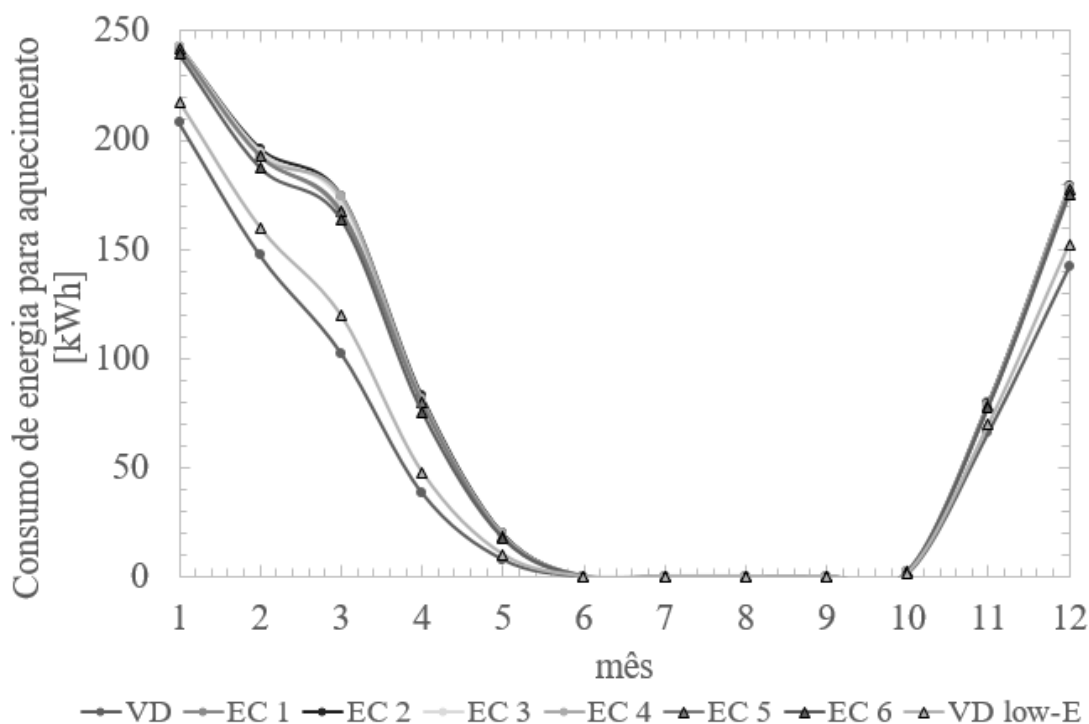


Figura 46 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 30°.

5.2.3.3 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação na configuração c)

Na Figura 47 está representada a evolução dos gastos de energia para iluminação do interior do escritório com a configuração c).

As janelas de vidro duplo e vidro duplo *low-E* resultaram em consumos de energia mensais para iluminação sempre muito próximos ao longo do ano, uma vez que ambas têm transmissividades de cerca de 0,8, tendo a janela de vidro duplo menores gastos. A diferença nos resultados destas janelas variou entre 1 kWh, em fevereiro, e 0,2 kWh, em junho e julho. Por outro lado, em comparação com a janela electrocromática (o melhor resultado) as diferenças variam entre 9,2 kWh em junho e 16,6 kWh em janeiro (EC5) e novembro (EC6).

A EC6 foi a estratégia que resultou no menor consumo anual na configuração c) com janela electrocromática, resultando no total de 286,5 kWh. Os meses de abril a setembro são os que resultaram nas reduções mais significativas dos gastos energéticos para iluminação em relação às outras estratégias. Por exemplo, para o mês de junho, a EC6 resultou na redução de pelo menos 31,3 kWh em comparação com qualquer outra estratégia. No entanto, para os meses inverno a EC6 não se destacou tanto.

As EC4 e EC5 tiveram novamente o melhor desempenho na minimização dos gastos de energia para iluminação nos meses de novembro, janeiro, fevereiro e dezembro, em que a radiação média incidente no plano horizontal foi sempre bastante inferior ao limite para mudança para o estado intermédio, I_1 . Apesar disso, a diferença existente no consumo de energia para iluminação em janeiro (0,4 kWh) prova que a mudança ocorreu. A EC5 resultou para este mês na estratégia de controlo que obteve menores gastos (43,1 kWh).

A EC1 resultou em cargas para iluminação bastante elevadas nos meses em que há arrefecimento, ultrapassando os 60 kWh por mês no verão (em que a EC6 resultou 10 kWh em necessidade de energia para iluminação). As restantes estratégias têm um desempenho bastante similar, tendo cargas mensais intermédias de cerca de 40 kWh, nestes meses (maio, junho, julho, agosto, setembro)

Durante os meses de inverno, os consumos de energia para iluminação são mais elevados, no geral. Neste período, o objetivo é maximizar os ganhos solares, as estratégias de controlo devem comandar a janela para o modo transparente na maioria do tempo. Como podemos concluir, as estratégias de controlo 4, 5 e 6 são as que mantêm o modo transparente durante mais tempo, tendo cargas de iluminação menores. A EC1 também tem um bom desempenho, no entanto tem consumos ligeiramente superiores. Apesar de tudo, nestes meses todas as estratégias de controlo têm um desempenho razoável.

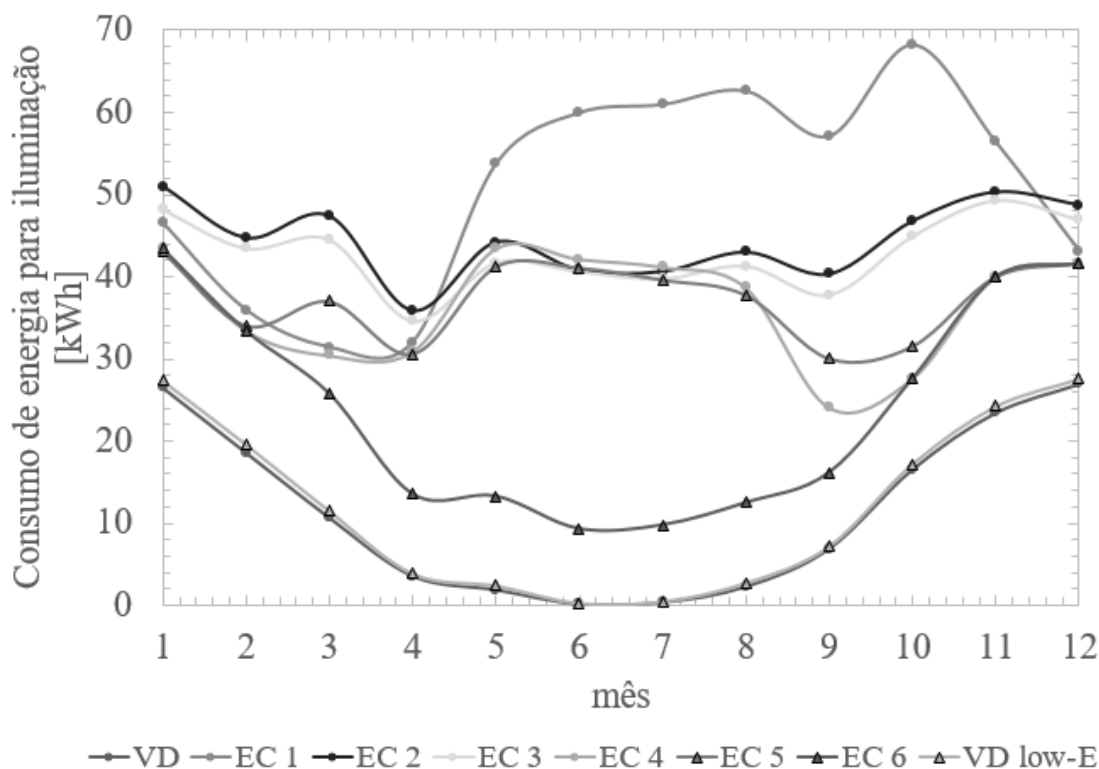


Figura 47 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação a 30°.

5.2.3.4 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração c)

Na Figura 48, está representado o consumo de energia total no escritório com configuração c). A janela de vidro duplo resultou no menor consumo total de energia durante os meses de janeiro (240 kWh), fevereiro (169,1 kWh), março (125 kWh) e dezembro (170,6 kWh), uma vez que resultou nos menores consumos para iluminação e aquecimento. A janela de vidro *low-E* foi a que resultou em melhores resultados nos meses de abril (92,6 kWh) e novembro (132,9), em que o consumo de energia para arrefecimento já foi mais necessário. A EC6 permitiu os melhores resultados nos meses de maio (124,2 kWh), junho (261,8 kWh), julho (433 kWh), agosto (483,6 kWh) e setembro (310,7 kWh). A EC4 teve o menor consumo de energia total em outubro (189,6 kWh).

Embora, nos meses de arrefecimento, as cargas de arrefecimento ocupem uma porção bastante alta das cargas totais, podemos verificar que as cargas de iluminação são significativas, na medida em que afastam as curvas das cargas da janela electrocromática, que na Figura 45 estão sobrepostas.

A estratégia de controlo 6 tem melhor desempenho que as demais em todos os meses. A estratégia de controlo 4 permite menores cargas do que a estratégia de controlo 2, exceto nos meses de junho e julho. A estratégia de controlo 1 é a que causa cargas mais elevadas.

A estratégia de controlo baseada na radiação incidente na janela 2 h depois (EC3) apresenta melhores resultados do que a EC2, tal como aconteceu com a configuração b).

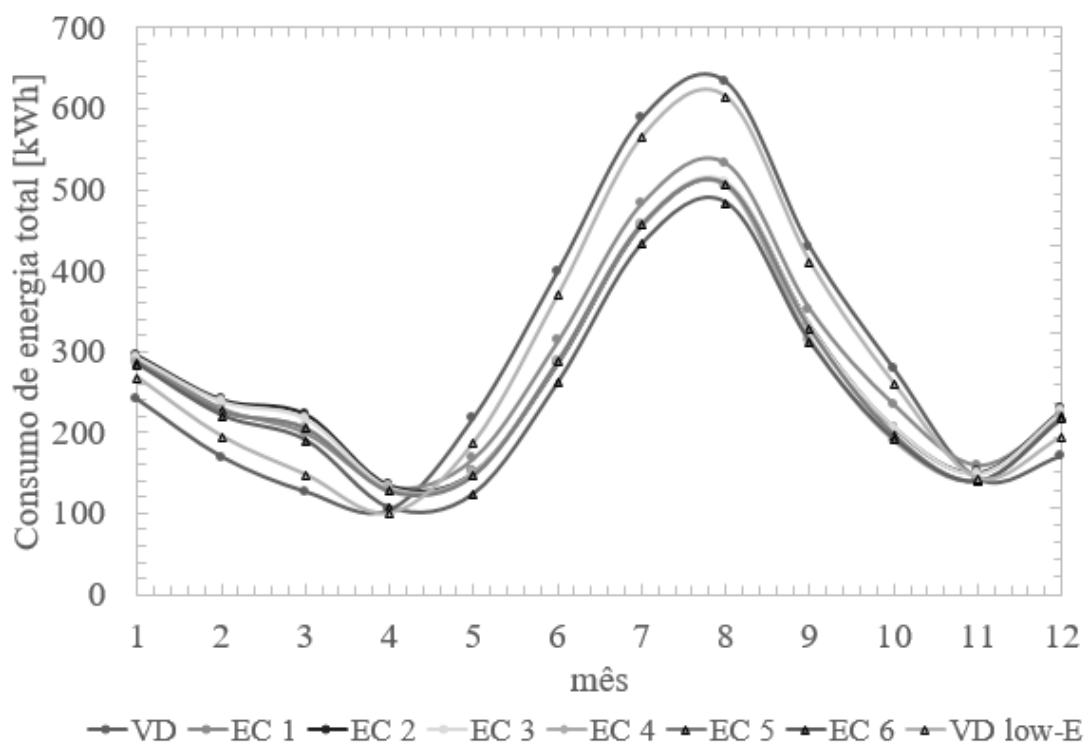


Figura 48 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a sul com inclinação de 30°.

Na Tabela 22, apresenta-se o consumo anual de energia em arrefecimento, aquecimento e iluminação, assim como o consumo anual total de energia.

Como se pode observar na tabela, apenas a EC 1 teve pior desempenho que a janela de vidro *low-E*. Todas as estratégias de controlo propostas permitiram uma redução de consumos quando comparadas com os resultados para com janela de vidro duplo. As estratégias de controlo 3, 4, 5 e 6 permitem reduções superiores a 300 kWh, sendo que com a EC6 ultrapassa os 500 kWh.

Por fim, verificou-se que a EC2 apresentou menores consumos de energia para arrefecimento. No entanto, a EC6 resultou em menores gastos energéticos totais, uma vez que permitiu os menores consumos de aquecimento e de iluminação.

Tabela 22 - Resultados dos consumos anuais de energia arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para sul com inclinação de 30°

Janela	Arrefecimento (kWh)	Aquecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)
VD	2644	713	138	3495
VD <i>low-E</i>	2286	778	144	3207
EC1	1741	962	608	3311
EC2	1697	976	534	3207
EC3	1713	967	513	3193
EC4	1704	969	437	3109
EC5	1725	958	448	3131
EC6	1737	938	287	2962

5.2.4 Resultados das simulações para a configuração d) do escritório

A configuração d) tem a mesma massa térmica a configuração a). A Figura 34 (secção 5.2.1) representa a radiação média mensal horária incidente no plano da janela (horizontal). Esta configuração, devido à inclinação horizontal da janela, implica que o edifício irá ter ganhos solares altos (radiação média horária incidente máxima de $3000 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$) nos meses de arrefecimento e ganhos solares baixos (radiação incidente média máxima $< 1500 \text{ kJ}/(\text{h.m}^2)$) nos meses de aquecimento. Ou seja, tem ganhos solares altos quando estes são indesejados e quando há carência de energia, os ganhos são baixos. Deste modo, espera-se que esta configuração permita menores consumos de energia total, ao provocar uma redução da energia consumida para arrefecimento de forma mais significativa do que o aumento dos gastos energéticos para aquecimento. Ao contrário do que aconteceu para as outras configurações, apenas se simularam 4 estratégias de controlo, uma vez que o plano horizontal e o plano da janela são o mesmo.

5.2.4.1 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração d)

Na Figura 40 está representado o consumo de energia para manter a temperatura interior da configuração d) do escritório abaixo de $22,5^\circ\text{C}$. Como pode ser visto na figura, o consumo de energia para arrefecimento com janela de vidro duplo é bastante superior ao da janela electrocromática, sendo a diferença máxima de $185,5 \text{ kWh}$ em julho, correspondente a 30% de redução.

Tal como na configuração c), as estratégias de controlo resultaram em consumos semelhantes, aparecendo na figura sobrepostas. A diferença máxima nos consumos anuais para arrefecimento com a janela electrocromática registou-se entre EC3 (consumo superior) e EC6 (consumo inferior) de $47,3 \text{ kWh}$. Assim, é possível distinguir a EC3 como a estratégia de controlo que provocou cargas de arrefecimento mais elevadas. A razão principal para a EC3 ter fraco desempenho, principalmente nos meses de radiação mais intensa, é o facto da estratégia se basear na previsão de 2h da radiação incidente. Esta estratégia resulta em ganhos solares superiores a EC2. Nesse sentido, os consumos de energia para arrefecimento com EC3 foram cerca de 7 kWh superiores aos de EC2 em todos os meses.

A EC 1 apresentou-se sempre no estado intermédio resultando numa grande redução de ganhos solares, principalmente nos meses de maio, junho e julho em que a diferença nos gastos energéticos para arrefecimento, em comparação com EC6 foi inferior a 2 kWh . A EC6 foi a estratégia com cargas de arrefecimento inferiores nos meses de maio, junho, julho e agosto. Uma vez que a EC6 apenas muda para o estado escuro se isso não implicar cargas de iluminação superiores, ou se a iluminação já estiver ligada e a temperatura for superior a T_2 , era expectável que a EC2 provocasse cargas de arrefecimento superiores, uma vez que I_2 foi ultrapassado com frequência, mantendo a janela no estado escuro durante períodos mais longos. Por outro lado, a EC2 permitiu cargas de arrefecimento inferiores nos meses de outubro (em $1,6 \text{ kWh}$) e setembro (em $3,1 \text{ kWh}$), meses em a radiação e luminosidade incidente são menores. Isto quer dizer, que aumentando ligeiramente o limite I_2 (mudança de intermédio para escuro) da EC 2 poder-se-á otimizar o controlo EC2 nos meses de ganhos solares maiores (maio, junho e julho), uma vez que esta mudança leva ao aumento de ganhos internos por iluminação, não compensando a redução dos ganhos solares.

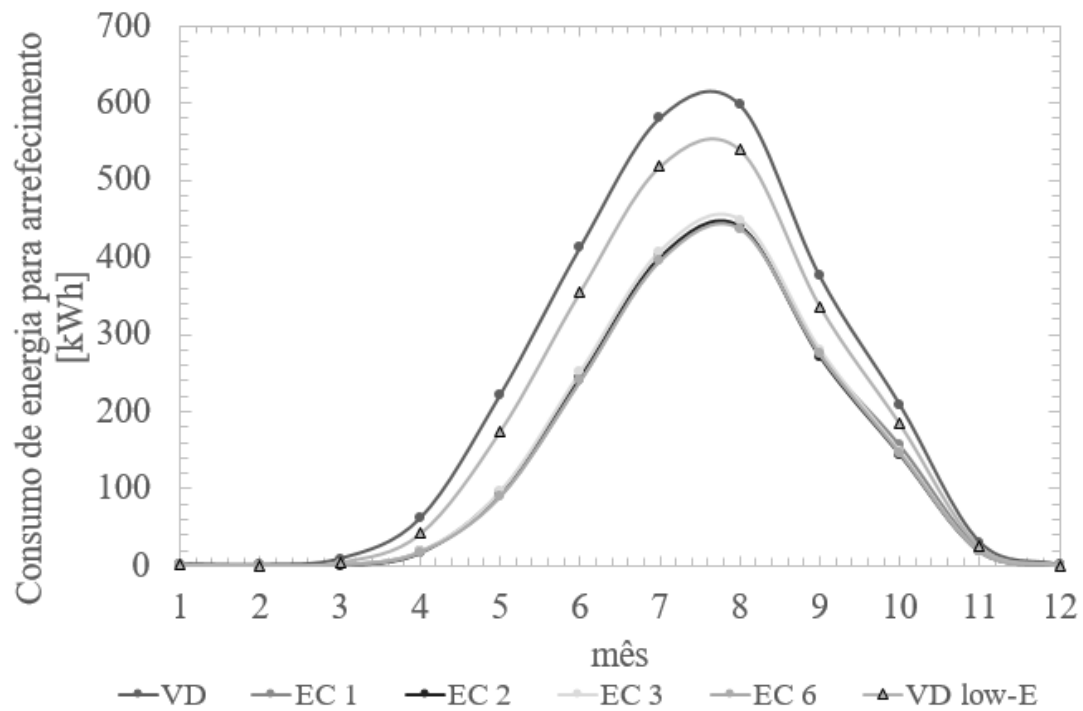


Figura 49 - Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela no plano horizontal.

5.2.4.2 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração d)

Na Figura 50 está representado a evolução dos consumos de energia para manter a temperatura interior do escritório com configuração d) acima de 21,5 °C ao longo do ano.

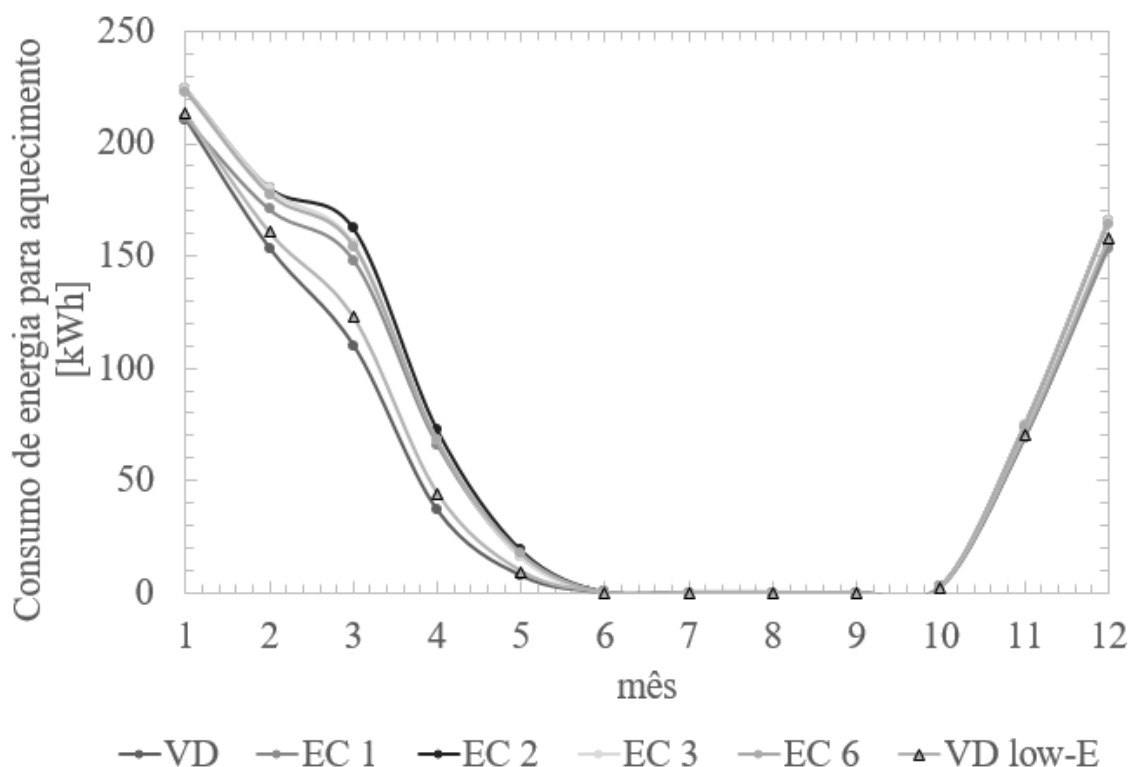


Figura 50 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela no plano horizontal.

A figura mostra que uma janela colocada no plano horizontal tem uma influência menor nas cargas de aquecimento do que a registadas nas outras configurações. Este resultado já seria expectável, sendo que a influência que a janela tem num edifício depende da quantidade de radiação que nela incide e, como mostra a Figura 34, a radiação média horária incidente neste plano no mês de janeiro, novembro e dezembro é bastante baixa (inferior a $1400 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$). Do mesmo modo, se observa que no mês de março e abril, meses em que a radiação média incidente já foi mais intensa (atingindo uma radiação média incidente superior a $2200 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$), as diferenças já foram maiores, sendo em março a diferença entre os resultados da janela de vidro duplo e a EC1 de $38,1 \text{ kWh}$.

Como pode ser observado, a EC 1 foi a que resultou em menor consumo anual de energia para aquecimento com janela electrocromática (836 kWh). No entanto, como podemos verificar pela comparação com a janela de vidro duplo para o mês de janeiro, em que a diferença é de apenas $0,3 \text{ kWh}$, parte do bom desempenho na minimização do consumo de energia para aquecimento se deve a ganhos internos para iluminação. Isto porque os ganhos solares obtidos pela janela de vidro duplo em comparação com os que são obtidos pela janela electrocromática foram superiores a $0,3 \text{ kWh}$. Do mesmo modo, se conclui que a EC1 teve menores cargas de aquecimento do que a EC6 (cerca de 7 kWh por mês), uma vez que provocou ganhos internos devido à iluminação, tendo ganhos solares menores.

Assim, verifica-se que a estratégia de controlo que comanda a janela para o estado transparente durante mais tempo, nos meses em que se pretende maximizar os ganhos solares, foi a EC6. A EC2 comanda, por vezes, a janela para o estado intermédio quando a radiação ultrapassa os $2400 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$. O mesmo aconteceu com a EC3, mas devido à mudança para o estado intermédio ocorrer 2 horas antes da radiação ultrapassar os $2400 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ e o processo inverso acontecer 2 horas antes da radiação voltar a ser inferior a $2400 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, a janela irá ter ganhos solares sempre superiores aos ganhos da EC2, uma vez que irá estar no estado transparente em momentos que a radiação incidente é superior. Desse modo, EC3 permitiu uma poupança energética anual de $14,6 \text{ kWh}$ relativamente a EC2.

5.2.4.3 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação na configuração d)

Na Figura 51 está representado o consumo de energia para iluminação do interior do escritório com configuração d), de modo a garantir a luminosidade média interior recomendada.

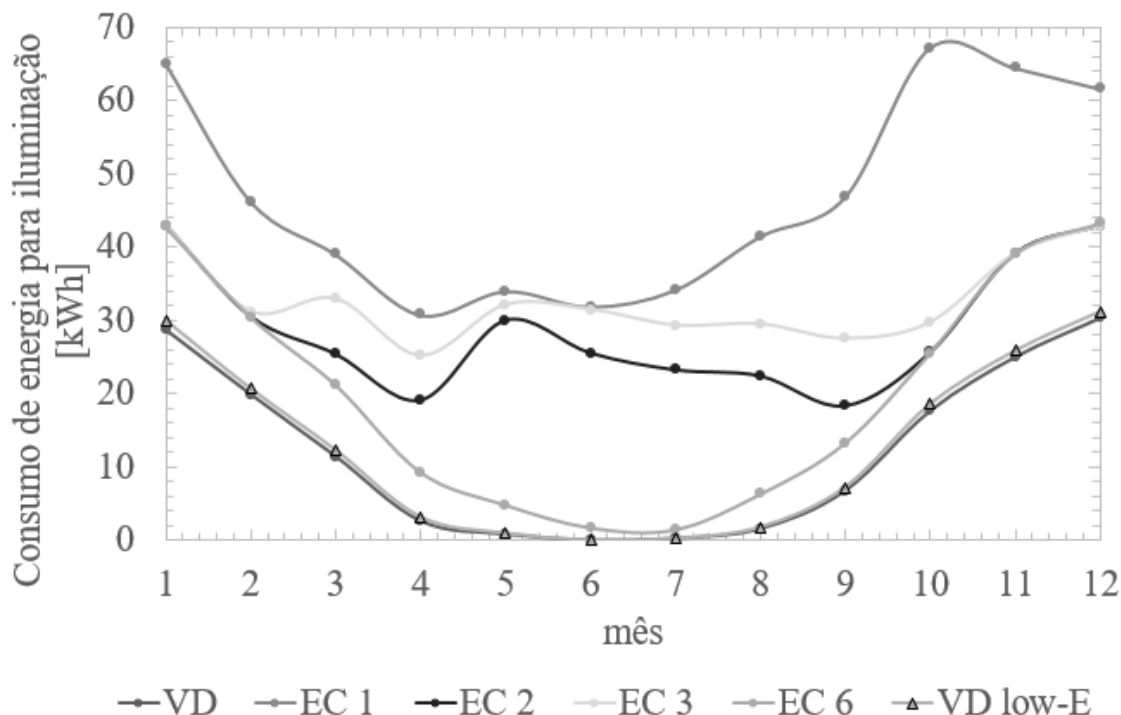


Figura 51 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela no plano horizontal.

Como era esperado, EC 1 resultou em gastos de energia para iluminação bastante altos nos meses de aquecimento (superior a 60 kWh em janeiro, outubro, novembro e dezembro), justificando as baixas necessidades energéticas para aquecimento, com os ganhos internos devido à iluminação.

A EC 6, como aconteceu para as configurações do escritório anteriores, resultou nos consumos de energia para iluminação mínimos para a janela electrocromática. Os consumos de energia para iluminação variaram da mesma forma que os da janela de vidro duplo, resultando num aumento superior das necessidades de iluminação em janeiro (aumento de 14,1 kWh) do que em junho (aumento de 1,8 kWh).

A EC2 e a EC3 resultaram em consumos de energia para iluminação semelhantes aos de EC6 para os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. A diferença máxima foi 0,6 kWh em fevereiro. Isto aconteceu porque nestes meses as estratégias EC2 e EC3 resultaram na apresentação do modo transparente da janela electrocromática na maioria do tempo.

Nos meses de arrefecimento, devido à maior altura solar, a luminosidade solar é, em geral, suficiente para manter a luminosidade média interior acima do nível recomendado. Nestes meses, a EC6 tem cargas de iluminação muito próximas de 0 kWh, principalmente nos meses de junho (1,8 kWh) e julho (1,5 kWh). A EC1 apresenta-se sempre no estado intermédio sendo a pior estratégia também nestes meses (consumos energéticos mensais superiores a 30 kWh). A EC2 e a EC3 têm cargas de iluminação próximas de EC1, uma vez que a radiação

média incidente mensal ultrapassa os 2400 kJ/(h.m²) e os 2800 kJ/(h.m²) nas horas de maior radiação.

5.2.4.4 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração d)

Na Figura 52 está representado o consumo de energia total em arrefecimento, aquecimento e iluminação na configuração d) do escritório.

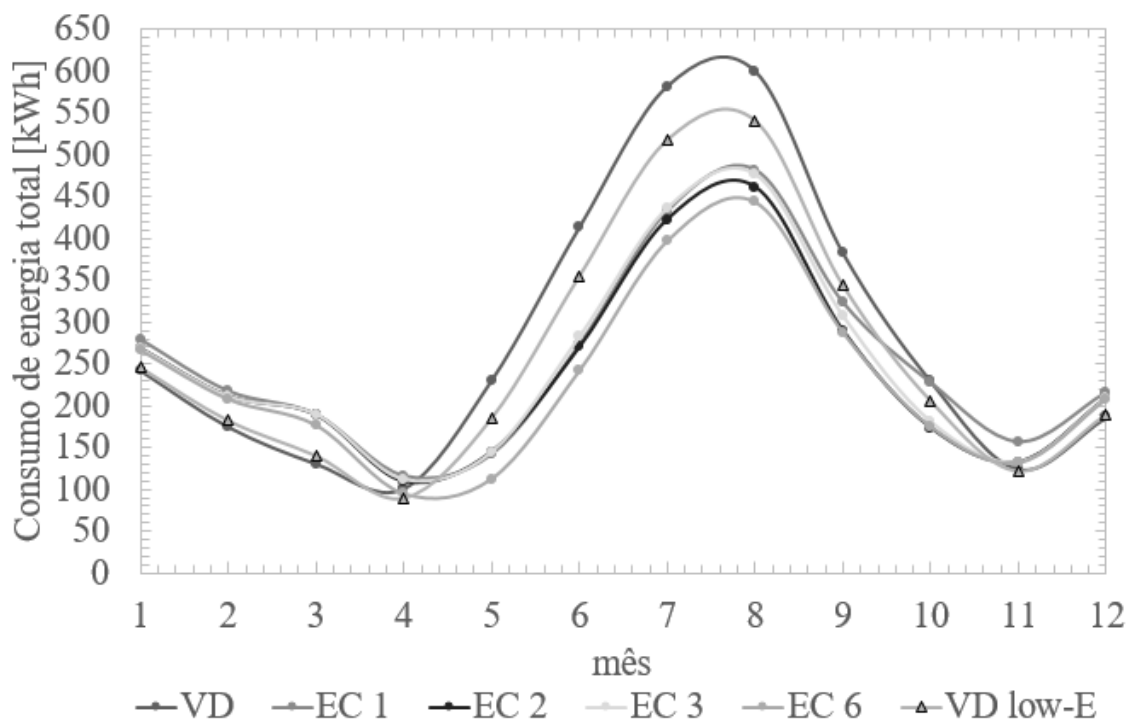


Figura 52 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela no plano horizontal.

A figura mostra que a janela de vidro duplo resultou em menores gastos energéticos totais para os meses de janeiro (242 kWh), fevereiro (174,8 kWh), março (130,8 kWh) e dezembro (186,1 kWh). A janela de vidro duplo *low-E* tem melhor desempenho nos meses de abril (89,3 kWh) e novembro (121,6 kWh). Nestes meses, a diferença para os resultados da janela electrocromática foi inferior a 30 kWh. Pelo contrário, nos meses de maio (112,4 kWh), junho (241,9 kWh), julho (397,1 kWh), agosto (443,9 kWh) e setembro (287,7 kWh), a EC6 resultou numa redução superior, em alguns casos, a 150 kWh relativamente à janela de vidro duplo. A EC2 no mês de outubro resultou no menor consumo de energia, 173,3 kWh, 55,6 kWh inferior ao vidro duplo. Como foi constatado anteriormente, esta configuração é a que permite menores diferenças entre os consumos de energia para aquecimento com janela de vidro duplo e com janela electrocromática, devido aos baixos ganhos solares nos meses de aquecimento. Do mesmo modo, se observou que durante os meses de arrefecimento, as cargas de iluminação da EC6 são quase nulas. Para além disso, esta configuração permitiu grandes reduções dos consumos de energia para arrefecimento. Assim, era expectável que esta fosse a configuração que permitisse uma maior redução no consumo total de energia.

Uma vez que a EC6 foi a estratégia que resultou em menores cargas de iluminação e arrefecimento, e, também, a que permitiu maiores ganhos solares nos meses de inverno, esta foi estratégia resultou no consumo total de energia menor de 2744 kWh, correspondente a uma redução de 640 kWh relativamente à janela de vidro duplo.

No entanto, constata-se que no mês de outubro a EC2 resultou em cargas totais menores. A EC2 segue um critério baseado radiação incidente na janela. Como no mês de outubro a radiação média horária incidente máxima é cerca de $1990 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, tal como aconteceu na configuração a) para um mês em que a radiação média incidente máxima é cerca de $1960 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, pode-se concluir que os limites usados para o controlo têm o melhor desempenho em meses que a radiação média mensal incidente máxima varia entre $1960 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ e $1990 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ e não existam necessidades de aquecimento.

Como a EC3 teve menores cargas de aquecimento e maiores cargas de arrefecimento do que a EC2, constata-se que a EC2 provocou cargas totais menores, como mostra a Tabela 23. Isto deveu-se ao facto de que consumo de energia para aquecimento sofreu um aumento menor do que a redução do consumo de energia para arrefecimento,

Tabela 23 - Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para sul com inclinação de 0°

Janela	Arrefecimento (kWh)	Aquecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)
VD	2506	743	145	3394
VD <i>low-E</i>	2183	781	152	3116
EC1	1652	836	563	3051
EC2	1632	902	346	2880
EC3	1670	887	394	2952
EC6	1623	881	240	2744

Embora não seja o objetivo deste trabalho comparar resultados entre diferentes configurações, não se pode deixar de reparar, ao comparar a Tabela 23 com a Tabela 21, que a EC6 resultou em consumos totais anuais semelhantes para a configuração a) e d), apesar da grande diferença que a janela de vidro duplo apresentou.

5.2.5 Resultados das simulações para a configuração e) do escritório

Tal como mostra a Figura 21 e), esta configuração diferencia-se da configuração a). Esta diferença é provocada pela rotação do edifício, de modo a que a parede externa e a janela, anteriormente voltada para sul, passasse a estar orientada para oeste. A principal diferença entre os modelos é a quantidade de radiação que incide na parede e na janela em cada hora, passando a ter ganhos solares mais significativos a partir das 12 h, como mostra a Figura 53. De acordo com a figura, para esta configuração a radiação horária incidente tem o seu máximo a meio da tarde, sendo tanto mais tarde quanto maior for o número de horas de insolação. Assim, para o mês de janeiro a radiação média horária incidente máxima de $959 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ocorreu às 15 h, enquanto que em julho se obteve $2327 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ às 17 h. Deste modo, esperam-se consumos de energia para arrefecimento superiores durante a tarde. Também os consumos de energia para aquecimento durante a manhã deverão sofrer um aumento. Deste modo espera-se que, relativamente à configuração a), a configuração e) apresente necessidades de energia superiores para aquecimento e iguais ou superiores para arrefecimento.

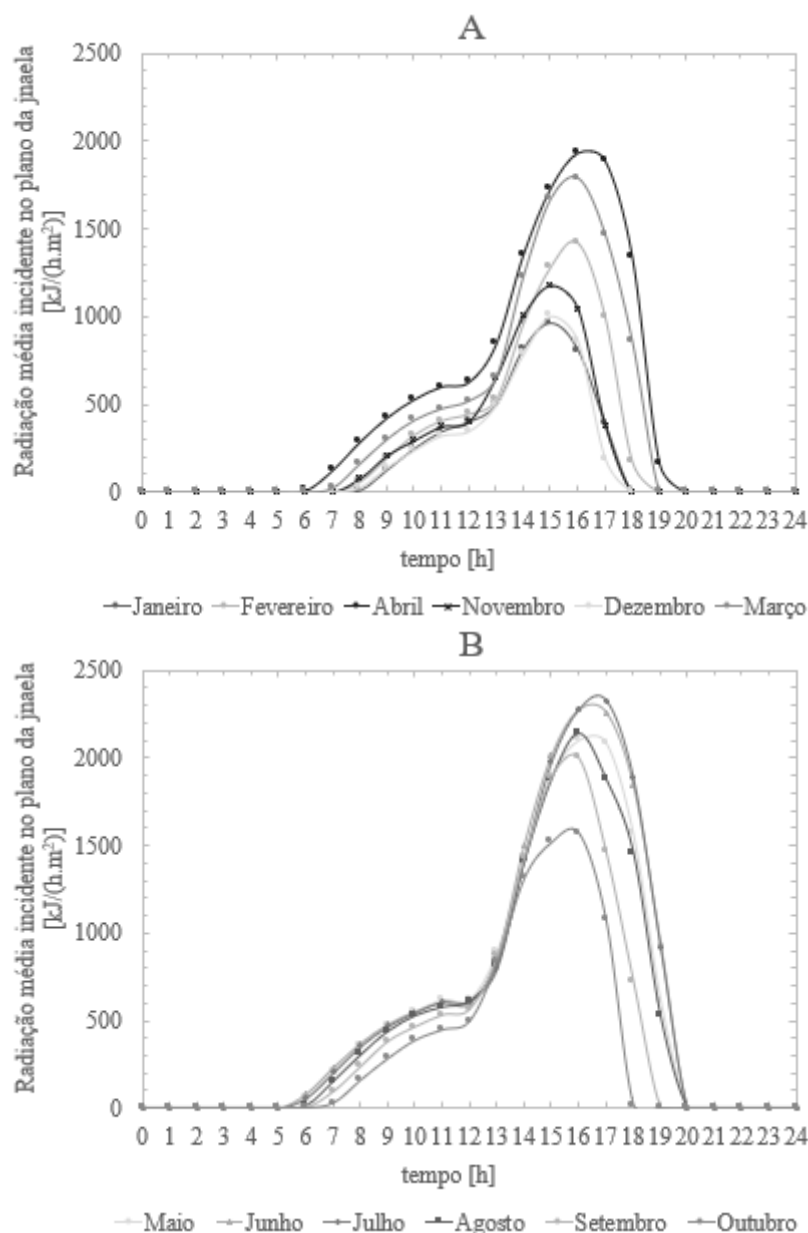


Figura 53 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).

5.2.5.1 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração e)

A configuração e) resultou em ganhos solares altos nos meses de arrefecimento, a partir das 12h, na medida em que resultou em consumos de energia para arrefecimento semelhantes ao da configuração a) (consumo anual para arrefecimento com janela de vidro duplo superior em 5,3 kWh). Na Figura 54 está representado a energia consumida para arrefecimento do interior do escritório com configuração e).

A janela electrocromática resultou para todas as estratégias na redução do consumo energético para arrefecimento. A redução máxima entre o melhor resultado da janela electrocromática e a janela de vidro duplo ocorreu em julho, em que a EC6 reduziu em 75,7 kWh o consumo com janela de vidro duplo. A EC6 foi a estratégia de controlo que resultou no consumo anual de energia para arrefecimento inferior de 1538 kWh. No entanto, observou-se que as estratégias de controlo têm um comportamento semelhante na redução dos gastos de energia para

arrefecimento. A diferença mensal máxima entre as várias estratégias ocorreu no mês de julho, em que a EC1 provocou consumos de energia para arrefecimento 12,2 kWh superiores aos de EC6.

O critério pela radiação incidente no plano da janela também apresenta bons resultados, revelando-se um bom critério caso seja otimizado. Como já era esperado a EC3 causa ganhos solares superiores contribuindo para que esta estratégia tenha carga de arrefecimento maiores do que a EC2. A EC1 voltou a ter um fraco desempenho nos meses de arrefecimento. A EC4 não permite uma grande redução das cargas de arrefecimento, uma vez que, nas horas de maior radiação incidente, esta estratégia comanda a janela para o estado transparente permitindo ganhos solares excessivos.

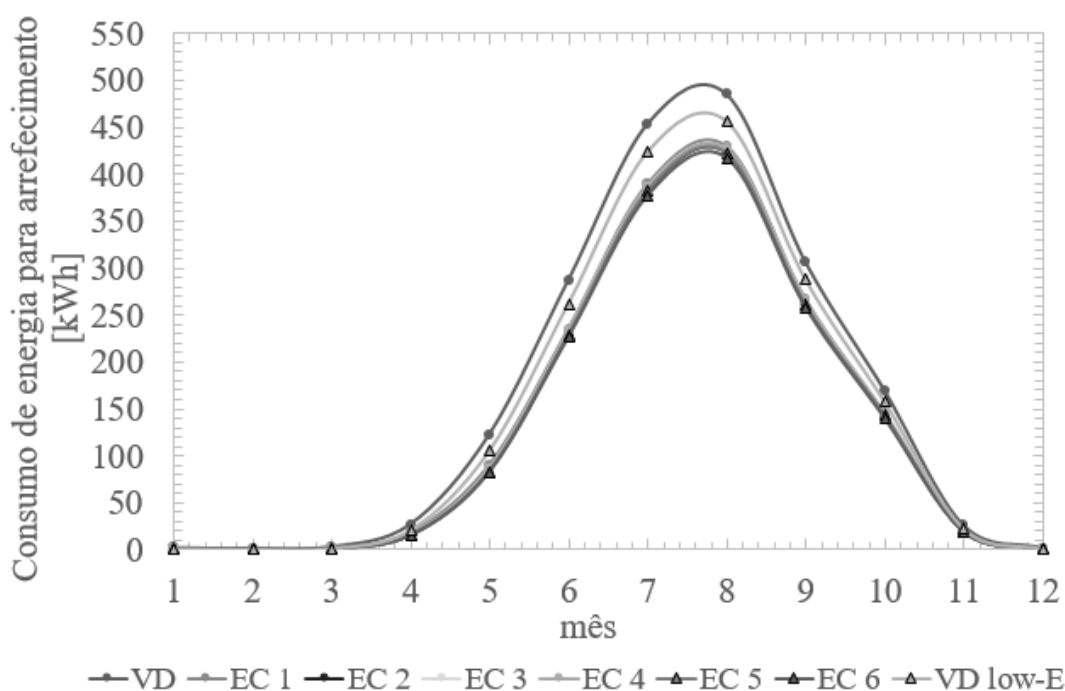


Figura 54 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°

5.2.5.2 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento na configuração e)

Para esta configuração, eram esperadas necessidades de energia para aquecimento superiores às da configuração a), uma vez que os ganhos solares são menores ao início do dia, momento em que há gastos de energia para aquecimento superiores. Na Figura 55 está representada a evolução dos consumos de energia para aquecimento do escritório com configuração e) ao longo do ano.

A diferença entre o consumo de energia para arrefecimento da janela electrocromática e a janela de vidro duplo são apenas significativas nos meses de fevereiro (8,8 kWh), março (18,18 kWh) e abril (13,4 kWh), meses em que a radiação média incidente é superior. Tal como já aconteceu para as configurações anteriores para os meses em que a radiação média incidente é baixa, o consumo de energia para aquecimento por vezes é menor numa estratégia de controlo que resultou em ganhos solares inferiores devido aos ganhos internos obtidos pela iluminação. Como o objetivo das estratégias de controlo é também reduzir o consumo de

energia para iluminação, a redução dos gastos energéticos com aquecimento por este motivo é indesejada.

A EC 6 foi a estratégia que resultou na menor necessidade de consumo de energia para aquecimento, 898,9 kWh, mantendo a janela no modo transparente durante períodos de tempo mais longo, ou porque é o único modo que permite uma luminosidade média interior superior a 550 lux ou porque a temperatura exterior é baixa. Esta estratégia aumentou o consumo de energia para aquecimento com janela de vidro duplo em apenas 55,2 kWh no ano inteiro.

A EC 4 apresentou novamente baixas cargas de aquecimento, sendo a segunda estratégia com melhor desempenho (diferença mensal máxima em relação a EC 6 de 2,7 kWh em abril). A EC5, embora tenha apresentado ganhos solares superiores relativamente à EC4 foi a que teve pior desempenho (913,4 kWh).

As EC 2 e EC 3 resultaram em consumos muito próximos dos atingidos pela EC6 (superiores em 9,8 e 10,4 respetivamente). Em suma, pode-se verificar que devido à baixa intensidade com que a radiação incide durante os meses de inverno (principalmente de manhã), o consumo de energia para aquecimento com janela electrocromática não sofreu um aumento significativo em relação ao da janela de vidro duplo.

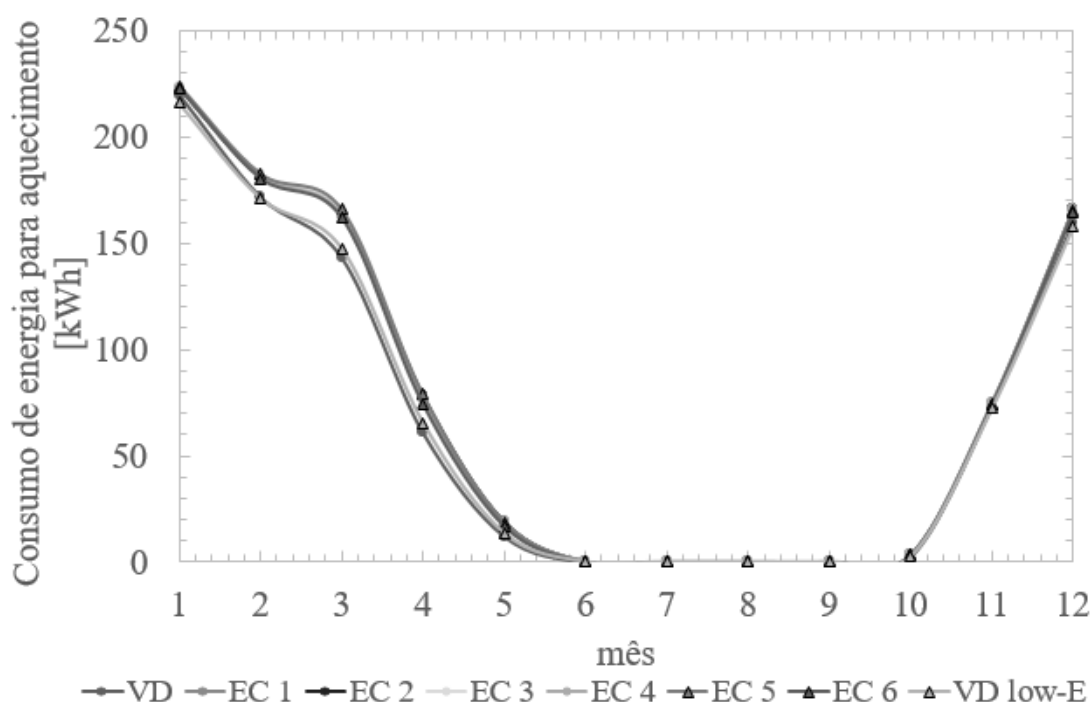


Figura 55 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°

5.2.5.3 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação na configuração e)

Na Figura 56 está apresentado a energia gasta em iluminação do escritório com configuração e) ao longo do ano, de modo a permitir uma luminosidade média interior superior a 450 lux.

Como se pode observar na figura, a janela electrocromática provocou o aumento dos consumos mensais de energia para iluminação relativamente aos da janela de vidro duplo e vidro duplo *low-E*, ao longo de todo o ano. A diferença entre as cargas de iluminação da

janela electrocromática e vidro duplo variou entre 7,8 kWh em dezembro e 22,8 kWh em junho.

A EC 6 foi estratégia que resultou no menor consumo de energia para iluminação, tendo provocado um consumo anual de 514,6 kWh.

A EC 2 levou a consumo de energia para iluminação superior à EC 3 durante os meses de janeiro (0,2 kWh), fevereiro (1,2 kWh) e março (1 kWh). Nestes meses, devido à menor quantidade de horas de sol, quando a radiação incidente ultrapassa I_1 não permanece acima de I_1 até ao fim do horário de trabalho. Desse modo, nestes meses, a EC3 levou a janela para o estado intermédio durante o mesmo período de tempo que EC2. No entanto, permitiu durante mais tempo uma luminosidade média interior superior a 450 lux. Nos meses de verão, geralmente a EC3 levou a janela para o estado intermédio durante períodos mais longos, provocando consumos energéticos para iluminação superiores aos de EC2.

A EC 4 resultou em cargas de iluminação altas no verão (>40 kWh por mês), uma vez que levou a janela para o estado intermédio ou escuro com mais frequência. Por outro lado, a EC5 devido à previsão de 2 h da radiação, apresentou o estado transparente durante mais tempo a partir das 12h, resultou em consumos de iluminação menores (<40 kWh).

A EC1 foi a estratégia com pior desempenho na redução do consumo de energia para iluminação, registando, geralmente, consumos mensais superiores a 60 kWh.

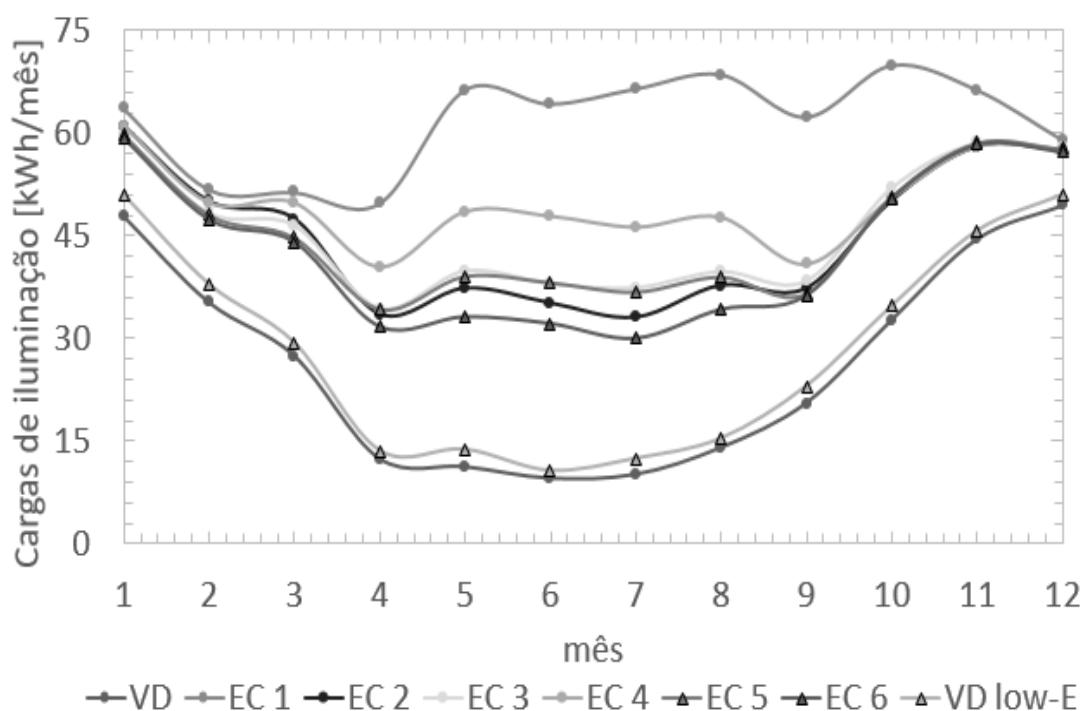


Figura 56 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°

5.2.5.4 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total na configuração e)

Na Figura 57 está representado o consumo de energia total para arrefecimento, aquecimento e iluminação da configuração e) do escritório.

Como se pode observar pela figura a janela de vidro duplo *low-E* resultou em cargas totais menores nos meses de novembro (140,9 kWh), dezembro (209,6 kWh) e janeiro (268,4 kWh). Este resultado deve-se à baixa radiação incidente na janela nas primeiras horas do dia, nas quais há necessidades superiores de energia para aquecimento. Desse modo, a transmissividade da janela não tem tanto impacto no consumo de energia para aquecimento, sendo as diferenças nos resultados mais influenciadas pela baixa emissividade da janela *low-E* e o menor valor do coeficiente global de transferência de calor. Nos meses de fevereiro, março e abril, a radiação média incidente foi superior e, por isso, a janela de vidro duplo resultou em menores consumos totais. A janela de vidro duplo resultou então num consumo total de energia de 207,6 kWh, em fevereiro, de 173,2 kWh, em março, e de 99,7 kWh. Nos restantes meses, a janela electrocromática (EC6) resultou nos gastos energéticos totais menores.

A EC 6 foi a estratégia que resultou em cargas totais menores em todos os meses, tal como já era esperado uma vez que é a estratégia que resultou em menores cargas de aquecimento, arrefecimento e iluminação. A estratégia de controlo 6 reduziu os consumos totais em relação a janela de vidro duplo *low-E* em julho em 28,8 kWh, enquanto que em março aumentou o consumo em 28,6 kWh. A EC1 resultou em cargas totais superiores à janela de vidro duplo em todos os meses, à exceção de julho (redução de 7,1 kWh) e agosto (redução de 0,6 kWh), tendo um desempenho mau ao longo de todo o ano.

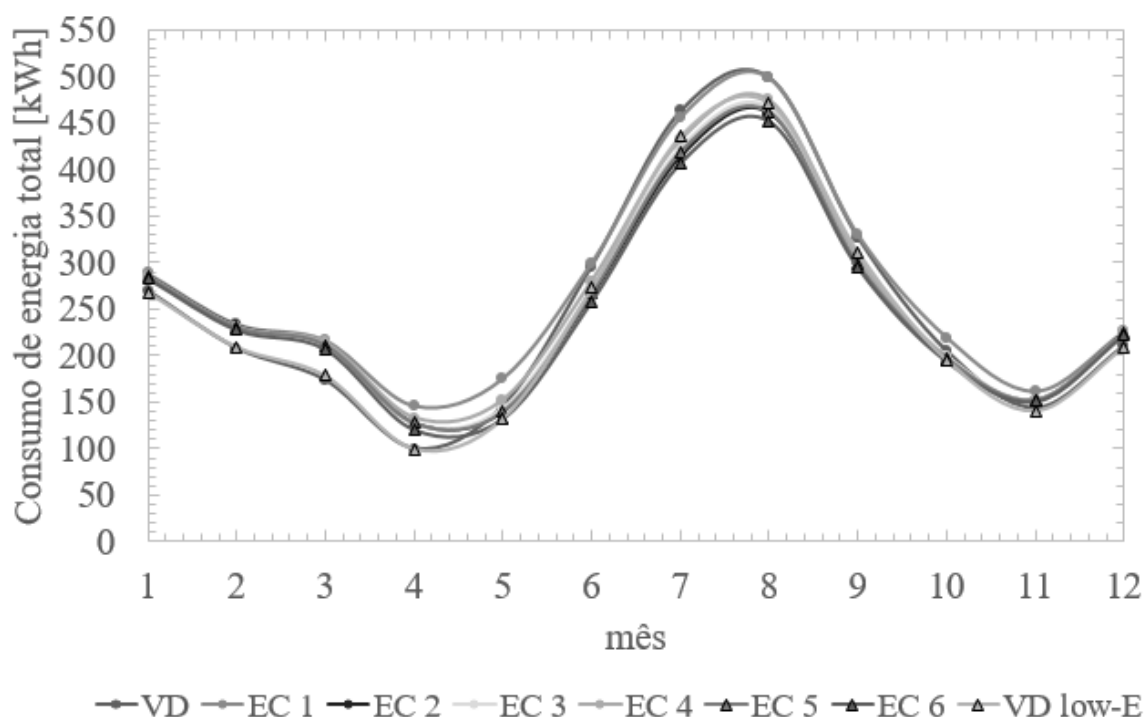


Figura 57 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a oeste com inclinação de 90°

Como mostra Tabela 24, para esta configuração, à exceção da EC1 todas as estratégias resultam em consumo de energia total resultados muito próximos, sendo a diferença máxima no gasto energético total anual entre a janela de vidro duplo *low-E* (melhor resultado, 2925 kWh) e a EC4 (pior resultado à exceção de EC1, 3080 kWh) de 155 kWh. De facto, a EC2, a EC3, EC5 e EC6 possibilitam reduções nas cargas totais relativamente aos consumos energéticos com janela de vidro duplo. De salientar, também, que a EC6 resultou na estratégia com menor consumo anual de energia para arrefecimento (menor 19,8 kWh que segunda melhor estratégia, EC2), para aquecimento (menor 7,8 kWh que segunda melhor estratégia, EC4) e para iluminação (menor 23,5 que segunda melhor estratégia, EC2).

Tabela 24 - Resultados dos consumos anuais de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total do modelo com janela orientada para oeste com inclinação de 90°

Janela	Arrefecimento (kWh)	Aquecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)
VD	1879	844	315	3038
VD <i>low</i> -E	1741	846	339	2925
EC1	1598,4	910	740	3248
EC2	1557	909	538	3004
EC3	1577	909	551	3037
EC4	1575	907	598	3080
EC5	1556	913	544	3016
EC6	1538	899	515	2951

5.2.6 Resultados das simulações para a configuração f) do escritório

A configuração f) tem a sua parede vertical exterior e janela orientada para este, assim como, a janela. Devido ao azimute da superfície exterior e da janela, a radiação incidente é mais intensa de manhã, esperando-se que contribua para menores necessidades de energia para aquecimento, relativamente às configurações e) e a). A Figura 58 mostra a radiação média mensal horária incidente no plano da janela.

Olhando a figura, nota-se que a radiação incidente é mais intensa de manhã e o seu máximo varia com o mês do ano. Por exemplo, para o mês de janeiro o máximo ocorre às 11 h, enquanto que no mês de julho às 9 h este já foi atingido. Para além disso, é possível verificar que a radiação média mensal horária máxima em janeiro é de apenas 947 kJ/(h.m²), enquanto que em junho ultrapassa os 2150 kJ/(h.m²). De facto, constata-se que de janeiro até junho, a radiação média mensal horária incidente aumenta, sendo o seu pico atingido cada vez mais cedo, de manhã, acontecendo o contrário de junho até dezembro.

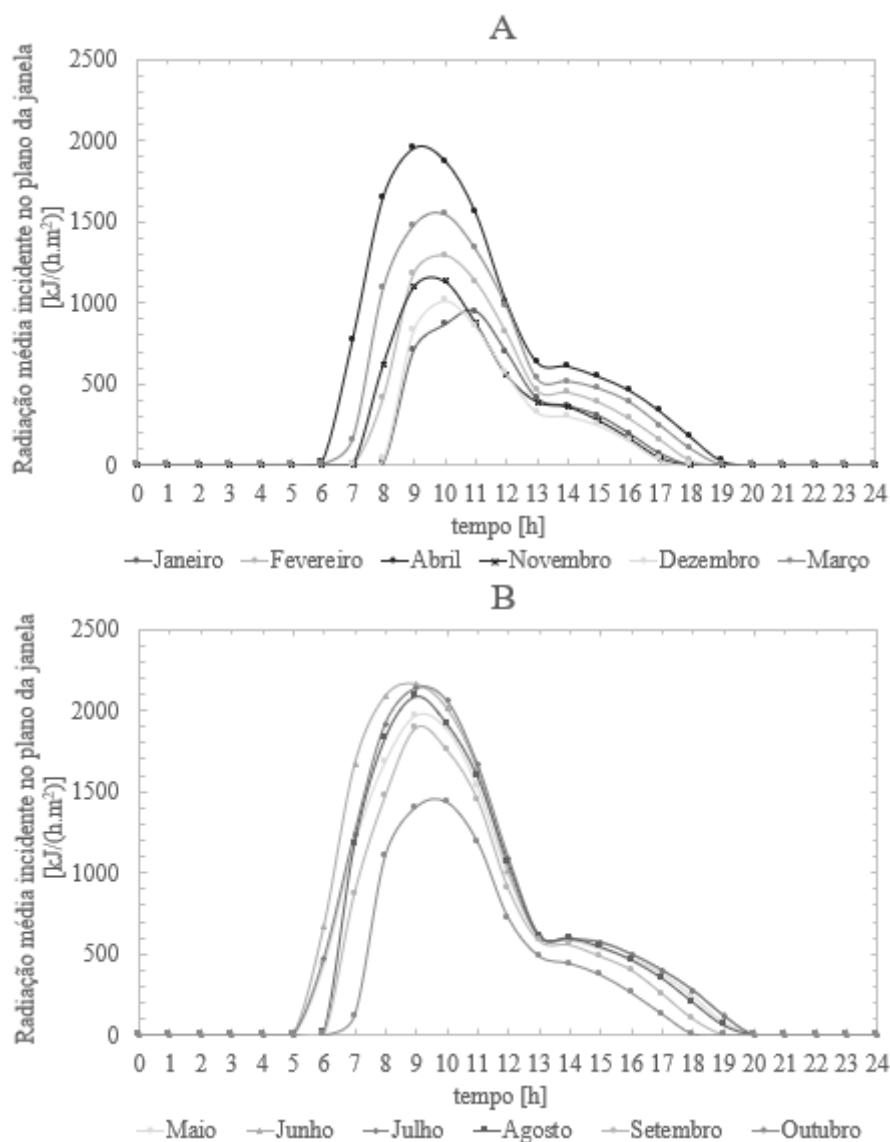


Figura 58 – Radiação média mensal horária incidente no plano da janela (A - meses de aquecimento; B – meses de arrefecimento).

5.2.6.1 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para arrefecimento na configuração f)

Na Figura 59 estão representados os consumos de energia para arrefecimento simulados para a configuração f) para as diferentes janelas e métodos de controlo.

A figura mostra que a janela de vidro duplo resultou em cargas de arrefecimento superiores à da janela electrocromática. No mês de julho, esta diferença de energia necessária para arrefecimento é máxima, sendo de 80,8 kWh.

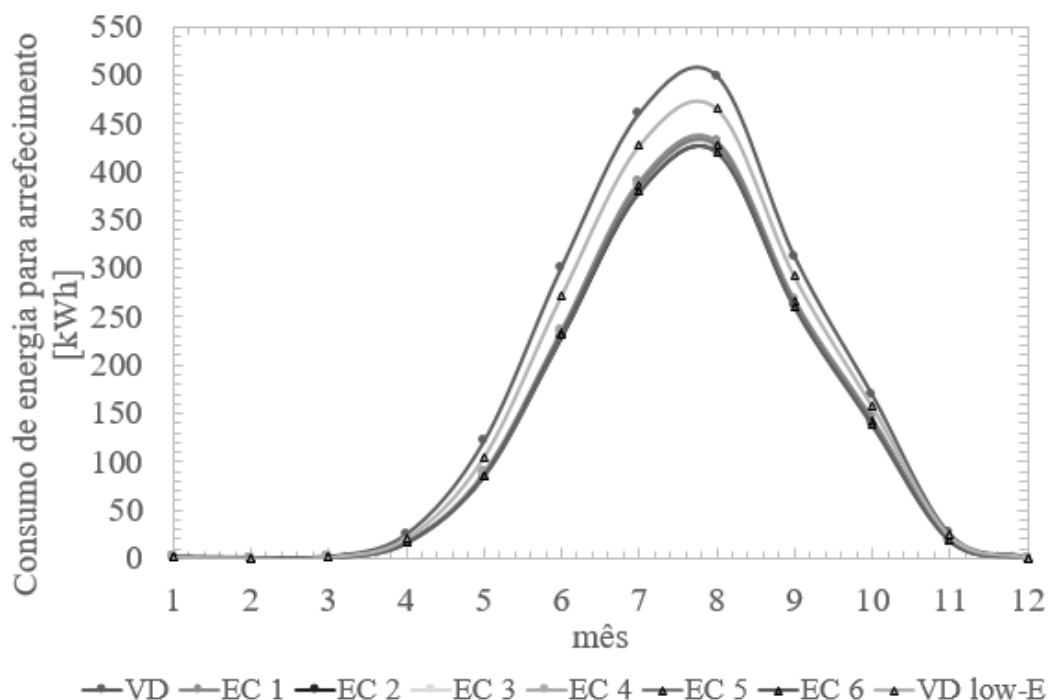


Figura 59 – Necessidade de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°

Nos meses de maior incidência solar (maio, junho e julho), a estratégia de controlo que resulta em menores consumos de energia para arrefecimento é a EC2. Este resultado era esperado visto que a estratégia de controlo modula a janela para o estado mais escuro quanto mais intensa for a radiação incidente. Entretanto, nos outros meses, a EC2 resulta no estado transparente com mais frequência, não tendo um desempenho tão bom na diminuição das cargas de arrefecimento. A estratégia de controlo 3, como já foi concluído anteriormente, permite ganhos solares superiores à EC2, por isso leva a gastos de energia para arrefecimento superiores. Por exemplo, as necessidades de arrefecimento foram 4,6 kWh superiores, para o mês de junho. Embora a EC6 resultou em cargas de arrefecimento superiores em 3,5 kWh no mês de junho às da EC2, esta é a estratégia de controlo que resultou em menores cargas de arrefecimento nos meses de agosto, setembro e outubro. De facto, no mês de outubro em que a radiação média mensal incidente máxima é 1400 kJ/(h.m²), a EC6 resulta em necessidades de energia para arrefecimento inferiores em 2,6 kWh às de EC2.

A EC1 mostrou um fraco desempenho para a configuração f), uma vez que nos meses de arrefecimento a janela electrocromática apresentou-se no estado intermédio (por não haver aquecimento), provocando ganhos internos por iluminação superiores (dobro). Consequentemente, esta estratégia de controlo resulta, ainda, em necessidades de arrefecimento suplementares. Em julho, a EC1 provocou consumos de energia para arrefecimento superiores em 10,5 kWh aos consumos resultantes de EC2.

A EC4 e a EC5 levam a janela electrocromática para o estado mais escuro, quando a radiação incidente no plano horizontal é elevada, o que ocorre nas horas intermédias (10 h - 16 h, por exemplo) do dia, estando no estado transparente ao início e fim do dia de trabalho. Deste modo, a redução dos ganhos solares é baixa. A EC5 como altera a janela para o estado mais escuro 2 h antes da EC4 reduz os ganhos solares num maior número de horas de alta intensidade de incidência de radiação na janela, atingindo uma poupança de 0,5 kWh no mês de junho relativamente à EC4.

5.2.6.2 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para aquecimento da configuração f)

Os consumos de energia para aquecimento para a configuração f) estão apresentados na Figura 60. Neste caso, era esperado que as cargas de aquecimento fossem menores que as da configuração e), mas tal não aconteceu para janeiro e dezembro. No entanto, para os meses de fevereiro, março, abril, maio e novembro este resultado já foi observado. Os meses que as diferenças de resultados foram mais notórias são os meses em que radiação média mensal máxima incidente foi superior a $1500 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ (março, abril e maio). Estes são também os meses em que há reduções mais significativa das cargas de aquecimento da configuração f) em relação às da configuração e).

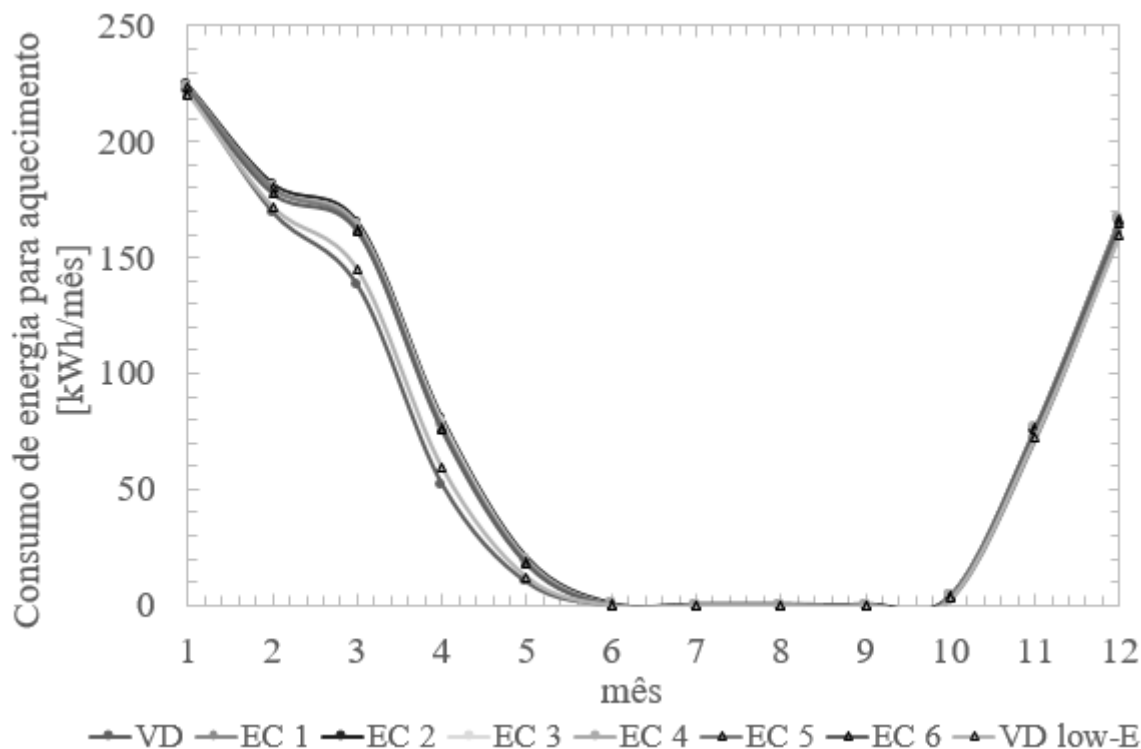


Figura 60 – Necessidade de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°

Com a estratégia de controlo 6 obteve-se as menores necessidades de aquecimento, com a configuração f). A carga anual foi de $898,1 \text{ kWh}$. Independentemente da radiação incidente, a EC6 teve um bom desempenho. No entanto, no mês de fevereiro as diferenças para as restantes estratégias de controlo são mais visíveis, sendo superiores a $2,5 \text{ kWh}$.

A estratégias de controlo baseadas num critério pela radiação horizontal (EC4 e EC5) apresentaram também bons resultados. A diferença no consumo anual de energia simulado para aquecimento anual não ultrapassou $12,5 \text{ kWh}$, em comparação com a EC6. A EC5 apresenta cargas inferiores a EC4 (cerca de 1 kWh/mês em março, abril e maio) apesar de provocar ganhos solares inferiores. A menor necessidade de energia para aquecimento, deve-se a ganhos internos por iluminação acrescidos, como mostra a Figura 61.

A estratégia de controlo 2 resultou em cargas de aquecimento consideradas razoáveis, uma vez que a radiação incidente no plano da janela raramente ultrapassou o limite I_1 ($2400 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$), como mostra a Figura 58. A janela electrocromática no modo transparente, durante os meses de aquecimento. A EC3 levou a ganhos solares superiores a EC2 quando $I > 2400$

$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, registando-se a maior diferença entre os consumos de energia para aquecimento, 1,4 kWh, no mês de fevereiro.

5.2.6.3 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia para iluminação para a configuração f)

Os gastos energéticos simulados para garantir uma luminosidade média interior superior a 450 lux com a configuração f) do modelo estão representados na Figura 61.

Como pode ser observado na figura, o melhor resultado da janela electrocromática representou um acréscimo de consumo energético para iluminação de cerca de 20 kWh por mês, relativamente ao uso de uma janela de vidro duplo. Devido a variações rápidas da luminosidade média no interior do escritório, a EC6 levou a que as cargas de iluminação ligeiramente sejam ligeiramente superiores às das outras estratégias para os meses de inverno (por 2 kWh nos meses de fevereiro e janeiro relativamente a EC1).

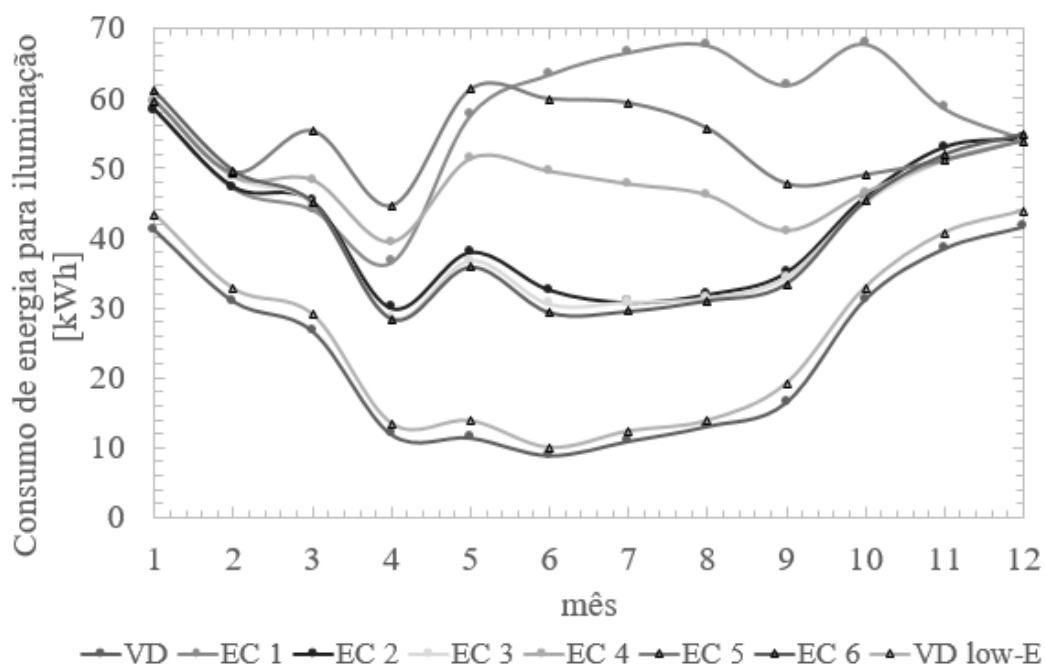


Figura 61 – Necessidade de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°.

Nos meses de aquecimento, a EC1, a EC4 e a EC5 resultaram em consumos de iluminação relativamente baixos (inferiores em 2 kWh às de EC6), uma vez que comandam a janela maioritariamente para o estado transparente. Nos meses de abril a outubro, isto já não acontece com a EC1 e a janela fica no estado intermédio. Por exemplo, em julho as cargas de iluminação com EC1 foram de 66,6 kWh, enquanto que com a EC6 apenas necessita de 29,5 kWh para iluminação. As EC4 e a EC5 também provocaram aumentos de iluminação elevados, tendo em julho cargas de iluminação de 47,6 e 59,3 kWh, respetivamente.

Comparando EC2 e EC3 com EC6, pode-se verificar que EC2 e EC3 apresentam consumos mensais de energia para iluminação inferiores cerca de 1 kWh aos gastos de EC6 entre outubro e março. O contrário acontece nos restantes meses. A EC3 permite uma maior transmissão de luz em relação a EC2, e, por isso, uma redução anual de 6,6 kWh nas necessidades de energia para iluminação.

5.2.6.4 Efeito das estratégias de controlo no consumo de energia total para a configuração f)

A evolução mensal dos consumos de energia totais com a configuração f) está representada na Figura 62. Numa primeira análise pode-se notar que nenhum dos casos pode ser considerado com ótimo ao longo do ano inteiro. Deste modo, a janela de vidro duplo resulta nos menores consumos totais nos meses de fevereiro (200,7 kWh), março (166,9 kWh), abril (89 kWh), novembro (135,7 kWh), dezembro (203,1 kWh); a janela de vidro duplo *low-E* tem os menores consumos totais nos meses de janeiro (265,3 kWh) e maio (130,1 kWh); a janela electrocromática com EC2 consegue os menores gastos em junho (260,8 kWh), enquanto que com a EC6 permite as menores cargas totais em julho (408,9 kWh), agosto (452 kWh), setembro (293,9 kWh), outubro (187,5 kWh).

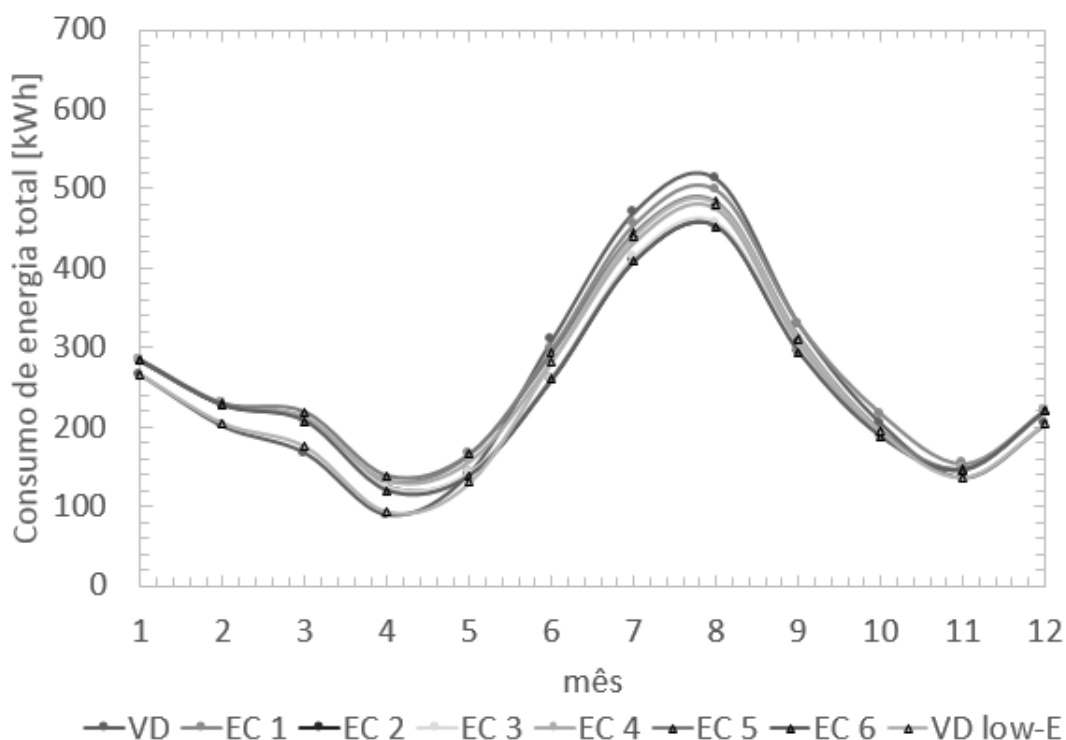


Figura 62 – Necessidade de energia total ao longo do ano com janela orientada a este com inclinação de 90°

Considerando apenas a janela electrocromática com a configuração f), os menores consumos foram obtidos utilizando EC6 em todos os meses, à exceção do mês de junho, em que a EC2 reduziu os gastos 0,1 kWh. Como junho é o mês em que a radiação incidente foi mais intensa, a EC2 apresentou o melhor desempenho através da maior poupança de energia para o consumo em arrefecimento, alterando a janela para um modo mais escuro, durante períodos mais longos. A EC2 apresenta baixos consumos totais ao longo de todo o ano. A diferença para EC6 foi inferior a 2 kWh por mês, exceto para os meses em que radiação média mensal horária máxima incidente foi entre 1500 e 1800 kJ/(h.m²)) (março, abril, setembro e outubro). Nestes casos, a diferença foi ligeiramente superior, mesmo assim, não ultrapassou os 6,5 kWh por mês.

A EC4 e a EC5 apresentaram uma boa performance nos meses de inverno, em que a energia total consumida mensalmente foi 2 kWh superior à de EC6. No entanto, nos meses de arrefecimento a diferença mensal ultrapassou os 20 kWh.

Nos meses de inverno, a EC1 apresentou um bom desempenho (diferenças para a EC6 inferiores a 1,5 kWh). No entanto, noutros meses do ano, já resultou em consumos bastante superiores, tendo em alguns casos gastos superiores por 40 kWh.

Na Tabela 25 estão resumidas as cargas anuais para a janela de vidro duplo convencional e *low-E* e para a janela electrocromática em função da estratégia de controlo. Como se pode ver na tabela, as estratégias de controlo EC2, EC3 e EC6 resultaram em consumos anuais totais inferiores às da janela de vidro duplo, em 55 kWh, em 50 kWh e em 80 kWh, respetivamente. Entretanto, a janela de vidro duplo *low-E* apresentou o consumo anual mais baixo, para esta configuração (2915 kWh).

Tabela 25 – Resultados dos consumos anuais de energia arrefecimento, em aquecimento e em iluminação com janela orientada para este com inclinação de 90°

Janela	Arrefecimento (kWh)	Aquecimento (kWh)	Iluminação (kWh)	Total (kWh)
VD	1917	826	283	3027
VD <i>low-E</i>	1767	843	305	2915
EC1	1598	917	684	3199
EC2	1553	917	503	2972
EC3	1568	914	496	2977
EC4	1580	911	582	3074
EC5	1580	908	646	3135
EC6	1554	898	495	2947

6 Conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros

6.1 Conclusões gerais

Os envidraçados electrocromáticos têm sido vistos como uma tecnologia promissora para reduzir os consumos energéticos em edifícios, principalmente em escritórios e hotéis, pela maior redução dos ganhos solares no verão. A procura de um maior conforto visual pelo aumento da área das superfícies envidraçadas, de forma geral, resulta em consumos energéticos para arrefecimento excessivos. A redução dos consumos energéticos é de fulcral importância, não só de um ponto de vista económico, mas também de um ponto de vista ecológico, uma vez que grande parte da energia provém, ainda, de fontes não renováveis de energia e com impactos ambientais graves. Assim, a tecnologia das janelas inteligentes foi desenvolvida para reduzir a transmissividade da superfície envidraçada seletivamente em certos comprimentos de onda. Nomeadamente, a redução de radiação próxima da infravermelha permitirá a redução de ganhos solares sem comprometer a luminosidade interior. A revisão da literatura realizada revelou que existem várias soluções de tecnologias para a modulação da radiação solar transmitida, onde os envidraçados electrocromáticos são talvez o mais promissor para aplicação em edifícios. Sendo assim, o presente trabalho focou-se nesta tecnologia. A literatura existente sobre esta tecnologia revelou que o maior número de estudos focou-se no desenvolvimento de novos materiais com propriedades electrocromáticas. Entretanto, falta informação sobre como controlar estes dispositivos para reduzir os consumos energéticos em edifícios com estratégias definidas.

A presente dissertação teve como principal objetivo analisar o efeito de diferentes estratégias de controlo de uma janela electrocromática, com uma superfície de 3 m², no consumo de energia para arrefecimento, aquecimento e iluminação de um escritório (20 m² de chão). Seis configurações diferentes foram consideradas com orientação da janela diferentes. Para além disso, pretendeu-se também avaliar o potencial das janelas electrocromáticas na redução do consumo de energia total do mesmo escritório. O trabalho foi feito através de uma abordagem numérica. Para esse efeito, utilizou-se o *software* TRNSYS. Vários modelos foram desenvolvidos; um para cada uma das seis configurações das janelas com vidro electrocromática e um para cada configuração considerando vidro duplo e vidro duplo *low-E*.

Estes últimos modelos foram desenvolvidos para usar como referência para a avaliação do potencial dos envidraçados electrocromáticos na poupança energética. Como indicadores do desempenho utilizou-se o consumo mensal e anual de energia para arrefecimento, para aquecimento, para iluminação e total. A influência do critério de controlo foi avaliada, implementando-se seis estratégias diferentes. Em primeiro lugar, o modelo desenvolvido foi validado com dados de literatura. Os resultados obtidos com o modelo com janela de baixa emissividade no plano horizontal apresentaram apenas ligeiras diferenças, quando comparados com os da literatura. No entanto, estas diferenças podem ser explicadas pelas incertezas associadas aos dados climatéricos, às propriedades termofísicas das paredes e aos

ganhos internos não revelados. Em conclusão, o modelo desenvolvido foi considerado como validado.

Pode-se concluir que a estratégia de controlo tem uma influência muito significativa no consumo de energia no edifício, considerando os dados meteorológicos de Palermo. É também possível verificar que uma estratégia ótima não foi identificada. O critério mais vantajoso para realizar a modulação da transmitância do vidro depende da altura do ano e das características da superfície envidraçada, nomeadamente, da orientação e inclinação. Por exemplo, na configuração b), a EC6 resultou no menor consumo anual de energia (3133, 2 kWh). Porém, no mês de outubro a EC4 provocou consumos de energia menores (183,2 kWh). Em termos globais, conclui-se que, em comparação com a janela de vidro duplo, a janela electrocromática resulta numa poupança energética anual que será tanto maior quanto mais intensa for a radiação incidente, durante os períodos em que há necessidades energéticas de arrefecimento, e quanto menor for a radiação incidente nos períodos de necessidades energéticas de aquecimento.

Para terminar, as janelas electrocromáticas apresentam-se como opções interessantes para edifícios com sustentabilidade melhorada. Esta dissertação mostrou que o controlo do estado da janela pela luminosidade interior e temperatura exterior (EC6) permite melhores resultados globais na redução do consumo de energia total. No entanto, há ainda espaço para melhorias no controlo, principalmente, nas condições climáticas em que a redução de ganhos solares poderá ser mais relevante do que o aumento do consumo de energia para iluminação.

6.2 Sugestões para trabalho futuro

Com base nos resultados do trabalho realizado sugerem-se várias oportunidades para estudos futuros. Em primeiro lugar, como qualquer modelo matemático, o modelo desenvolvido necessita de verificação experimental dos resultados obtidos por simulação. Seria interessante montar dois compartimentos idênticos: um equipado com janela convencional e outro com uma janela electrocromática, que permita também avaliar os desempenhos das janelas de forma direta. As estratégias de controlo 2 e 4 resultaram, de forma sazonal no menor consumo de energia. Uma vez que os parâmetros destes dois controladores, I_1 e I_2 , foram arbitrados, e que os resultados mencionados anteriormente ocorreram em períodos caracterizados por evoluções da intensidade de radiação incidente semelhantes, sugere-se a otimização destas, fazendo variar os limites I_1 e I_2 em função da altura do ano. Da mesma maneira, sugere-se a implementação de uma estratégia de controlo que combine parâmetros baseados na radiação incidente na janela no momento e na previsão de 2h dessa radiação; ou baseada na radiação incidente na janela e a radiação incidente no plano horizontal.

O estudo do efeito da alteração do tipo de lâmpada nos consumos de energia total também seria um estudo interessante. Não só para avaliar se os resultados da estratégia de controlo 6 se devem a um grande consumo de energia devido ao uso de uma lâmpada ineficiente, mas também porque existe uma tendência para a utilização de lâmpadas LED, nos últimos anos. As lâmpadas LED são lâmpadas que consomem menos energia e provocam também ganhos internos menores.

Sugere-se ainda estudar o efeito no desempenho das estratégias de controlo que o intervalo de modulação da janela electrocromática provoca, uma vez que dependendo do fabricante poderão existir janelas electrocromáticas com um intervalo de modulação bastante diferente. O estudo do efeito das estratégias de controlo em climas diferentes, nomeadamente no Porto ou Algarve também seria interessante, uma vez que são cidades portuguesas com clima ligeiramente diferente do de Palermo. Adicionalmente, a alteração do modelo para um

intervalo de temperatura de conforto de, por exemplo, 22-26°C pode ser estudada, uma vez que esta tem um impacto muito grande nos consumos de energia.

Como a tendência aponta para a construção de edifícios com superfícies envidraçadas cada vez maiores, seria interessante estudar o modo como variam os consumos energéticos de um edifício e o efeito das estratégias de controlo nestes para razões de área de janela/área de parede exterior superiores.

Por último, seria interessante o estudo da integração numa janela electrocromática de um controlador que não se limite a modular as propriedades óticas, permitindo também aumentar a ventilação natural através da redução da vedação (com recurso a sistemas pneumáticos, por exemplo), aumentando dessa forma a taxa de infiltração do edifício.

Referências

1. Granqvist CG. Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices. *Thin Solid Films*. 2014;564:1-38.
2. Nations U. World Population Prospects: The 2010 Revision. In: Affairs DoEaS, editor. Population Division 2011.
3. Hassouneh K, Alshboul A, Al-Salaymeh A. Influence of windows on the energy balance of apartment buildings in Amman. *Energy Conversion and Management*. 2010;51:1583-91.
4. Directive EE. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32. *Official Journal, L*. 2012;315:1-56.
5. Allen K, Connelly K, Rutherford P, Wu Y. Smart windows—Dynamic control of building energy performance. *Energy and Buildings*. 2017;139:535-46.
6. Kamalisarvestani M, Saidur R, Mekhilef S, Javadi FS. Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:353-64.
7. Standard A. Standard 55-2010:“Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”; ASHRAE. Atlanta USA. 2010.
8. Kuehn TH, Ramsey JW, Threlkeld JL. Thermal environmental engineering: Pearson College Division; 1998.
9. Richter B, Goldston D, Crabtree G, Glicksman L, Goldstein D, Greene D, et al. How America can look within to achieve energy security and reduce global warming. *Reviews of Modern Physics*. 2008;80:S1-S109.
10. Eurostat. Energy from renewable sources. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_from_renewable_sources2017.
11. Tajima K, Hotta H, Yamada Y, Okada M, Yoshimura K. Environmental durability of electrochromic switchable mirror glass at sub-zero temperature. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012;104:146-51.

12. Dussault J-M, Gosselin L, Galstian T. Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. *Solar Energy*. 2012;86:3405-16.
13. Schultz JM, Jensen KI. Evacuated aerogel glazings. *Vacuum*. 2008;82:723-9.
14. U-VALUES - DESIGNING BUILDINGS WIKI.
<https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/U-values2016>.
15. Incropera FP, De Witt DP. Fundamentals of heat and mass transfer. 1985.
16. Jelle BP, Kalnæs SE, Gao T. Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives. *Energy and Buildings*. 2015;96:329-56.
17. Azens A, Granqvist C. Electrochromic smart windows: energy efficiency and device aspects. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2003;7:64-8.
18. Baetens R, Jelle BP, Gustavsen A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010;94:87-105.
19. Zarkadis N. Novel models towards predictive control of advanced building systems and occupant comfort in buildings. 2015.
10. Lee ES, Selkowitz SE, Clear RD, DiBartolomeo DL, Klems JH, Fernandes LL, et al. A design guide for early-market electrochromic windows. Lawrence Berkeley National Laboratory. 2006.
21. Clear RD, Inkarojrit V, Lee ES. Subject responses to electrochromic windows. *Energy and Buildings*. 2006;38:758-79.
22. Czanderna A, Benson D, Jorgensen G, Zhang J-G, Tracy C, Deb S. Durability issues and service lifetime prediction of electrochromic windows for buildings applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1999;56:419-36.
23. Gillaspie DT, Tenent RC, Dillon AC. Metal-oxide films for electrochromic applications: present technology and future directions. *Journal of Materials Chemistry*. 2010;20:9585-92.
24. Li W, Ji S, Qian K, Jin P. Preparation and characterization of VO₂(M)-SnO₂ thermochromic films for application as energy-saving smart coatings. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2015;456:166-73.
25. Li SY, Niklasson GA, Granqvist CG. Thermochromic fenestration with VO₂-based materials: Three challenges and how they can be met. *Thin Solid Films*. 2012;520:3823-8.
26. Hoffmann S, Lee ES, Clavero C. Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014;123:65-80.
27. Kiri P, Hyett G, Binions R. Solid state thermochromic materials. *Advanced Materials Letters*. 2010;1:86-105.

28. Granqvist CG, Green S, Niklasson GA, Mlyuka NR, von Kræmer S, Georén P. Advances in chromogenic materials and devices. *Thin Solid Films*. 2010;518:3046-53.
29. Mlyuka NR, Niklasson GA, Granqvist CG. Thermochromic multilayer films of VO₂ and TiO₂ with enhanced transmittance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009;93:1685-7.
30. Parkin IP, Manning TD. Intelligent thermochromic windows. *J Chem Educ*. 2006;83:393.
31. Ye H, Meng X, Xu B. Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window. *Energy and Buildings*. 2012;49:164-72.
32. Saeli M, Piccirillo C, Parkin IP, Binions R, Ridley I. Energy modelling studies of thermochromic glazing. *Energy and Buildings*. 2010;42:1666-73.
33. Byrne R, Ventura C, Benito Lopez F, Walther A, Heise A, Diamond D. Characterisation and analytical potential of a photo-responsive polymeric material based on spiropyran. *Biosensors and Bioelectronics*. 2010;26:1392-8.
34. Sousa C, Saraiva S, Macedo H, Coelho P. Grey colouring thermally reversible photochromic 1-vinylidene-naphthofurans. *Dyes and Pigments*. 2017;141:269-76.
35. Larnpert C. Chromogenic switchable glazing: towards the development of the smart window. *Window innovations*. 1995;95.
36. Xie X, Zheng M, Fu S, Shi F, Wang X, Zhan N. Photochromism of spirooxazine-doped polymers studied by monitoring dynamics of holographic gratings. 2015. p. 95210A-A-6.
37. Zou Q, Li X, Zhou J, Bai K, Ågren H. Synthesis and photochromism of a spirooxazine derivative featuring a carbazole moiety: Fast thermal bleaching and excellent fatigue resistance. *Dyes and Pigments*. 2014;107:174-81.
38. Miao L, Ina Y, Tanemura S, Jiang T, Tanemura M, Kaneko K, et al. Fabrication and photochromic study of titanate nanotubes loaded with silver nanoparticles. *Surface Science*. 2007;601:2792-9.
39. Chu NYC. Chapter 24 - Spirooxazines A2 - Dürr, Heinz. In: Bouas-Laurent H, editor. *Photochromism (Revised Edition)*. Amsterdam: Elsevier Science; 2003. p. 879-82.
41. Sen C, Mallick D, Patra C, Roy S, Sinha RK, Ghosh R, et al. Spectroscopic characterization, photochromism and mesomorphism of cadmium(II)-1-alkyl-2-(aryloxy)imidazole complexes and DFT correlative studies. *Polyhedron*. 2016;117:463-77.
41. Development of switchable mirror sheet using gasochromic method: New technology for energy-saving window glass. <https://phys.org/news/2013-03-switchable-mirror-sheet-gasochromic-method.html2013>.

42. Feng W, Zou L, Gao G, Wu G, Shen J, Li W. Gasochromic smart window: optical and thermal properties, energy simulation and feasibility analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016;144:316-23.
43. Wittwer V, Datz M, Ell J, Georg A, Graf W, Walze G. Gasochromic windows. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2004;84:305-14.
44. Georg A, Graf W, Neumann R, Wittwer V. Stability of gasochromic WO₃ films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2000;63:165-76.
45. Georg A, Graf W, Neumann R, Wittwer V. Mechanism of the gasochromic coloration of porous WO₃ films. *Solid State Ionics*. 2000;127:319-28.
46. Krašovec UO, Orel B, Georg A, Wittwer V. The gasochromic properties of sol-gel WO₃ films with sputtered Pt catalyst. *Solar Energy*. 2000;68:541-51.
47. Wittwer V, Graf W, Georg A. Gaschromic glazings with a large dynamic range in total solar energy transmittance. *Proceedings of Glass Processing Days2001*.
48. Bao S, Tajima K, Yamada Y, Okada M, Yoshimura K. Color-neutral switchable mirrors based on magnesium-titanium thin films. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. 2007;87:621-4.
49. Orel B, Grošelj N, Krašovec UO, Gabršček M, Bukovec P, Reisfeld R. Gasochromic effect of palladium doped peroxopolytungstic acid films prepared by the sol-gel route. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 1998;50:234-45.
50. Lampert CM. Smart switchable glazing for solar energy and daylight control. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1998;52:207-21.
51. Gardiner D, Morris S, Coles H. High-efficiency multistable switchable glazing using smectic A liquid crystals. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009;93:301-6.
52. Bonsor K. How Smart Windows Work. HowStuffWorkscom. <http://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window.htm2001>.
53. Chakrapani S, Slovak SM, Saxe RL, Fanning B. SPD films and light valves comprising same. Google Patents; 2002.
54. How Smart Windows Work. HowStuffWorkscom. <http://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window.htm2001>.
55. Ostermann R, Smarsly B. Does mesoporosity enhance thin film properties? A question of electrode material for electrochromism of WO₃. *Nanoscale*. 2009;1:266-70.
56. Wu H, Kong D, Ruan Z, Hsu P-C, Wang S, Yu Z, et al. A transparent electrode based on a metal nanotrough network. *Nat Nano*. 2013;8:421-5.

57. Ramadan R, Kamal H, Hashem HM, Abdel-Hady K. Gelatin-based solid electrolyte releasing Li⁺ for smart window applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2014;127:147-56.
58. Avellaneda CO, Vieira DF, Al-Kahlout A, Leite ER, Pawlicka A, Aegerter MA. Solid-state electrochromic devices with Nb₂O₅:Mo thin film and gelatin-based electrolyte. *Electrochimica Acta*. 2007;53:1648-54.
59. Cupelli D, Nicoletta FP, Manfredi S, Filpo GD, Chidichimo G. Electrically switchable chromogenic materials for external glazing. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2009;93:329-33.
60. Barbosa PC, Fernandes M, Silva MM, Smith MJ, Vilela SM, Gonçalves A, et al. Di-ureasil hybrids doped with LiBF₄: attractive candidates as electrolytes for "Smart Windows". *International Journal of Electrochemical Science*. 2011;6:3355-77.
61. Bayrak Pehlivan İ, Granqvist CG, Marsal R, Georén P, Niklasson GA. [PEI-SiO₂]:[LiTFSI] nanocomposite polymer electrolytes: Ion conduction and optical properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2012;98:465-71.
62. Lavi O, Frey G, Siegmann A, Ein-Eli Y. Enhanced tungstate electrochromism via formation of transparent conductive networks. *Electrochemistry Communications*. 2008;10:1210-3.
63. Garcia G, Buonsanti R, Runnerstrom EL, Mendelsberg RJ, Llordes A, Anders A, et al. Dynamically modulating the surface plasmon resonance of doped semiconductor nanocrystals. *Nano letters*. 2011;11:4415-20.
64. Kim J, Ong GK, Wang Y, LeBlanc G, Williams TE, Mattox TM, et al. Nanocomposite architecture for rapid, spectrally-selective electrochromic modulation of solar transmittance. *Nano letters*. 2015;15:5574-9.
- [65] Llordés A, Garcia G, Gazquez J, Milliron DJ. Tunable near-infrared and visible-light transmittance in nanocrystal-in-glass composites. *Nature*. 2013;500:323-6.
66. Garcia G, Buonsanti R, Llordes A, Runnerstrom EL, Bergerud A, Milliron DJ. Near-Infrared Spectrally Selective Plasmonic Electrochromic Thin Films. *Advanced Optical Materials*. 2013;1:215-20.
67. Manthiram K, Alivisatos AP. Tunable localized surface plasmon resonances in tungsten oxide nanocrystals. *Journal of the American Chemical Society*. 2012;134:3995-8.
68. Özer N, Rubin MD, Lampert CM. Optical and electrochemical characteristics of niobium oxide films prepared by sol-gel process and magnetron sputtering A comparison. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1996;40:285-96.
69. Heusing S, Sun DL, Otero-Anaya J, Aegerter MA. Grey, brown and blue coloring sol-gel electrochromic devices. *Thin Solid Films*. 2006;502:240-5.
70. Remund J, Kunz S. METEONORM: Global meteorological database for solar energy and applied climatology: Meteotest; 1997.

71. Klein S, Beckman W, Mitchell J, Duffie J, Duffie N, Freeman T, et al. TRNSYS 16. A TRaNsient SYstem Simulation Program; Mathematical Reference. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison: Madison, WI, USA. 2004;5.
72. ISO E. 7730. Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Standards Norway, Oslo, Norway. 2005.
73. Butcher K, Craig B. Environmental Design: CIBSE Guide A: Chartered Institution of Building Services Engineers; 2015.
74. Zinzi M. Office worker preferences of electrochromic windows: a pilot study. *Building and Environment*. 2006;41:1262-73.
75. Page J, Scartezzini J-L, Kaempf J, Morel N. On-site performance of electrochromic glazings coupled to an anidolic daylighting system. *Solar Energy*. 2007;81:1166-79.
76. DeForest N, Shehabi A, Selkowitz S, Milliron DJ. A comparative energy analysis of three electrochromic glazing technologies in commercial and residential buildings. *Applied Energy*. 2017;192:95-109.
77. Tavares PF, Gaspar AR, Martins AG, Frontini F. Evaluation of electrochromic windows impact in the energy performance of buildings in Mediterranean climates. *Energy Policy*. 2014;67:68-81.
78. Ajaji Y, André P. Support for Energy And Comfort Management in An Office Building using Smart Electrochromic Glazing: Dynamic Simulations.
79. Perez R, Seals R, Ineichen P, Stewart R, Menicucci D. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar energy*. 1987;39:221-31.

ANEXO A: Tabelas de consumo de energia para arrefecimento, aquecimento, iluminação e total ao longo do ano

Tabela A1 – Consumo de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 90°

mês	Consumo de energia para arrefecimento (kWh)							
	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	10,7	6,7	2,9	2,2	2,2	2,6	2,6	2,3
Fevereiro	4,0	1,9	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Março	6,3	3,3	1,8	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2
Abril	27,6	21,7	18,0	14,6	14,6	15,4	15,3	14,7
Maio	96,7	87,7	83,2	73,8	73,8	82,3	77,9	73,3
Junho	239,5	227,9	224,5	211,1	211,1	224,1	218,2	208,2
Julho	403,5	386,8	378,4	362,7	362,6	375,1	369,3	359,0
Agosto	468,4	443,8	427,1	411,8	411,9	419,0	417,6	409,1
Setembro	328,4	303,1	273,8	261,0	264,2	264,4	266,3	261,6
Outubro	224,7	198,4	158,7	146,6	152,1	149,9	153,2	150,0
Novembro	60,2	46,9	27,5	24,1	24,2	25,8	25,8	24,4
Dezembro	3,9	2,4	1,3	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0
Total	1873,8	1730,4	1597,7	1510,0	1519,0	1560,9	1548,7	1505,2

Tabela A2 – Consumo de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 90°

	Consumo de energia para aquecimento (kWh)							
mês	VD	VD- <i>low</i> -E	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC5	EC 6
Janeiro	178,3	184,7	199,9	212,7	211,3	210,4	210,7	208,2
Fevereiro	133,3	141,0	161,5	173,9	171,2	170,5	170,2	166,1
Março	113,3	123,5	150,0	160,0	156,0	161,0	155,2	153,1
Abril	61,6	65,4	84,7	82,5	82,4	79,9	79,3	79,8
Maio	17,0	17,7	25,2	21,5	21,5	20,3	20,5	20,8
Junho	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
Julho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	2,1	2,1	3,8	3,1	2,9	3,0	2,9	2,9
Novembro	59,3	60,6	69,9	70,9	70,1	69,9	69,8	69,3
Dezembro	114,2	121,5	141,4	153,8	152,7	150,5	150,5	147,6
Total	679,0	716,6	837,2	878,6	868,4	865,7	859,5	848,1

Tabela A3 – Consumo de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 90°

	Consumo de energia para iluminação (kWh)							
mês	VD	VD <i>low</i> -E	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	29,4	29,7	61,2	48,0	46,5	40,9	40,4	40,9
Fevereiro	22,2	22,8	49,7	38,3	39,7	32,8	33,5	32,8
Março	16,4	17,2	45,6	35,5	38,8	35,2	40,1	28,0
Abril	10,7	11,8	37,0	21,6	21,7	39,3	37,0	21,6
Maio	13,8	15,3	55,2	29,9	30,0	60,3	51,7	29,9
Junho	13,6	15,3	63,8	30,2	30,2	61,0	51,9	30,2
Julho	13,7	15,2	67,1	28,4	28,3	59,0	50,2	28,4
Agosto	12,1	13,1	68,9	24,7	24,8	51,4	47,0	24,7
Setembro	10,4	11,5	62,0	20,0	23,6	33,8	34,0	19,9
Outubro	18,9	19,4	67,5	32,7	38,1	27,7	31,4	27,5
Novembro	27,1	28,2	58,5	45,9	45,0	37,6	37,8	37,6
Dezembro	29,8	30,3	54,9	46,5	44,7	38,3	38,3	38,3
Total	218,0	229,8	691,3	401,7	411,3	517,4	493,4	359,8

Tabela A4 – Consumo total de energia ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 90°

	Consumo de energia total (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	218,4	221,0	264,1	262,9	260,0	253,8	253,8	251,5
Fevereiro	159,4	165,6	211,7	212,3	211,0	203,5	203,8	199,1
Março	135,9	144,1	197,4	196,5	195,8	197,3	196,5	182,3
Abril	100,0	98,9	139,6	118,7	118,7	134,6	131,6	116,1
Maio	127,4	120,7	163,6	125,3	125,3	162,9	150,1	124,0
Junho	253,1	243,3	289,0	241,6	241,6	285,3	270,4	238,7
Julho	417,1	402,0	445,4	391,1	390,9	434,2	419,6	387,3
Agosto	480,5	456,8	496,0	436,5	436,7	470,4	464,6	433,8
Setembro	338,9	314,6	335,8	281,0	287,8	298,2	300,3	281,5
Outubro	245,6	220,0	230,0	182,3	193,2	180,6	187,5	180,4
Novembro	146,6	135,7	155,9	140,9	139,2	133,3	133,4	131,3
Dezembro	147,9	154,2	197,6	201,3	198,4	189,9	189,9	186,9
Total	2770,8	2676,8	3126,3	2790,4	2798,7	2944,1	2901,5	2713,0

Tabela A5 – Consumo de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 60°

	Consumo de energia para Arrefecimento (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	6,8	4,0	0,1	0,0	0,1	0,4	0,4	0,4
Fevereiro	2,8	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Março	7,5	2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Abril	40,0	27,0	8,2	8,6	9,3	8,9	9,5	11,9
Maio	145,0	115,0	52,6	57,8	60,0	52,4	55,4	67,3
Junho	324,3	286,0	190,0	205,7	207,1	191,6	194,8	214,2
Julho	522,4	475,8	362,3	380,0	382,2	366,1	369,9	391,3
Agosto	590,6	539,3	415,9	430,9	434,2	425,6	429,7	449,3
Setembro	407,9	364,1	248,7	258,0	261,8	266,6	269,2	278,7
Outubro	262,7	224,8	120,5	125,8	129,7	144,0	144,7	146,5
Novembro	58,2	43,0	10,8	10,8	12,3	17,1	17,0	17,3
Dezembro	1,8	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	2370,0	2083,6	1409,2	1477,5	1496,7	1472,7	1490,7	1577,1

Tabela A6 – Consumo de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 60°

	Consumo de energia para aquecimento (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	218,3	229,5	297,9	308,6	305,0	296,8	296,8	293,5
Fevereiro	156,4	171,5	240,9	256,4	253,1	240,6	240,6	233,3
Março	115,7	135,5	212,3	237,5	232,8	224,1	221,7	203,9
Abril	52,9	64,7	113,5	121,5	120,2	122,1	120,7	105,3
Maio	12,1	15,0	34,0	35,1	35,2	37,2	37,1	29,6
Junho	0,0	0,0	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
Julho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	1,2	1,4	6,4	5,9	5,7	5,3	5,3	5,1
Novembro	68,1	71,1	113,1	115,9	115,2	109,7	109,8	108,2
Dezembro	143,9	156,7	224,5	237,5	234,4	223,9	224,0	220,1
Total	768,6	845,5	1243,1	1318,7	1301,9	1260,2	1256,3	1199,4

Tabela A7 – Consumo de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 60°

	Consumo de energia para iluminação (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	32,7	34,3	47,5	56,5	52,0	44,9	44,9	44,6
Fevereiro	25,1	25,5	37,1	48,7	46,5	35,5	36,2	35,6
Março	18,4	19,3	33,4	50,8	48,1	40,4	42,1	30,0
Abril	10,1	10,7	35,9	37,8	36,2	39,1	37,4	21,5
Maio	9,6	11,0	59,6	43,7	42,9	54,4	49,2	24,4
Junho	8,6	9,5	65,3	35,4	36,7	54,1	48,0	21,2
Julho	8,5	9,4	67,1	36,3	36,2	51,6	46,4	20,5
Agosto	9,8	10,4	69,9	43,6	42,6	48,6	46,3	22,0
Setembro	11,7	12,4	62,4	42,2	40,1	35,0	35,0	20,9
Outubro	20,7	21,5	69,6	52,3	48,8	33,9	36,4	32,2
Novembro	30,1	32,4	55,7	55,0	51,8	41,5	41,5	41,6
Dezembro	32,2	33,1	43,3	53,2	50,2	42,1	42,1	42,2
Total	217,4	229,5	646,9	555,5	532,0	521,2	505,4	356,7

Tabela A8 – Consumo de energia total ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 60°

mês	Consumo de energia total (kWh)							
	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	257,8	267,8	345,5	365,1	357,0	342,1	342,1	338,5
Fevereiro	184,2	198,1	278,0	305,1	299,6	276,1	276,8	268,9
Março	141,5	157,5	245,7	288,3	280,8	264,5	263,8	234,0
Abril	103,0	102,4	157,6	167,9	165,7	170,1	167,6	138,7
Maio	166,7	140,9	146,2	136,6	138,0	144,1	141,6	121,3
Junho	332,9	295,5	255,7	241,5	244,2	246,2	243,3	235,7
Julho	530,9	485,2	429,4	416,2	418,3	417,7	416,3	411,9
Agosto	600,3	549,8	485,9	474,4	476,8	474,2	476,0	471,3
Setembro	419,6	376,5	311,1	300,2	301,9	301,5	304,1	299,6
Outubro	284,6	247,8	196,5	184,0	184,2	183,2	186,4	183,8
Novembro	156,4	146,5	179,6	181,7	179,3	168,3	168,3	167,1
Dezembro	177,9	190,7	267,8	290,7	284,6	266,1	266,1	262,3
Total	3355,9	3158,6	3299,1	3351,8	3330,5	3254,1	3252,4	3133,2

Tabela A9 - Consumo de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 30°

mês	Consumo de energia para Arrefecimento (kWh)							
	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	5,7	3,5	1,3	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2
Fevereiro	3,5	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Março	13,0	5,8	0,8	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Abril	61,9	40,9	18,5	16,2	16,4	16,6	16,8	17,3
Maio	208,5	162,0	93,7	87,0	87,8	87,4	88,1	93,6
Junho	398,9	343,1	252,6	244,8	248,0	244,8	247,6	252,4
Julho	587,8	524,7	422,6	415,0	418,2	415,3	418,3	423,3
Agosto	630,4	568,1	470,4	463,8	467,5	465,6	469,1	471,2
Setembro	421,1	373,5	294,7	290,7	292,7	290,4	297,5	294,5
Outubro	259,3	222,3	163,1	156,7	159,2	159,8	163,4	161,5
Novembro	52,4	39,2	22,9	20,9	20,9	21,6	21,7	21,5
Dezembro	1,7	1,0	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Total	2644,2	2285,5	1741,4	1697,1	1712,5	1703,7	1724,8	1737,4

Tabela A10 - Consumo de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 30°

	Consumo de energia para aquecimento (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	207,7	217,5	242,1	242,7	242,7	241,8	242,1	239,2
Fevereiro	147,0	159,7	193,0	195,9	194,5	193,0	192,7	187,2
Março	102,3	119,4	166,5	174,6	172,1	174,7	167,5	163,6
Abril	38,4	47,8	80,9	82,6	80,5	81,7	79,9	75,5
Maio	7,9	10,0	19,8	19,8	18,2	19,7	18,2	17,4
Junho	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
Julho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	1,4	1,6	2,4	2,3	2,3	2,2	2,1	2,2
Novembro	66,0	69,5	79,5	79,4	78,6	78,4	78,4	77,6
Dezembro	141,9	152,2	177,3	178,8	178,2	177,1	177,2	175,0
Total	712,6	777,6	961,6	976,0	967,2	968,6	958,1	937,7

Tabela A11 – Consumo de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 30°

	Consumo de energia para iluminação (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	26,5	27,3	46,6	51,0	48,2	43,5	43,1	43,5
Fevereiro	18,6	19,6	36,0	44,7	43,5	33,5	34,1	33,5
Março	10,7	11,5	31,4	47,4	44,5	30,4	37,0	25,8
Abril	3,6	3,9	32,0	35,9	34,6	30,9	30,6	13,5
Maio	1,9	2,4	53,7	44,2	41,7	43,4	41,3	13,3
Junho	0,1	0,3	60,0	40,8	40,6	42,1	41,1	9,3
Julho	0,3	0,5	61,0	40,6	39,7	41,2	39,7	9,7
Agosto	2,3	2,7	62,6	43,0	41,3	38,7	37,8	12,5
Setembro	6,9	7,2	57,1	40,3	37,8	24,1	30,0	16,2
Outubro	16,6	17,2	68,3	46,8	44,9	27,6	31,5	27,6
Novembro	23,4	24,2	56,4	50,3	49,3	40,0	40,0	40,0
Dezembro	27,0	27,6	43,2	48,7	47,0	41,7	41,7	41,7
Total	137,8	144,3	608,2	533,7	513,1	437,1	447,9	286,5

Tabela A12 – Consumo de energia total ao longo do ano com janela orientada a sul e inclinada a 30°

	Consumo de energia total (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	240,0	248,3	290,0	294,7	291,9	286,5	286,4	283,9
Fevereiro	169,1	180,8	229,2	240,6	238,0	226,4	226,8	220,7
Março	126,0	136,7	198,8	222,4	217,0	205,6	205,0	189,9
Abril	103,8	92,6	131,4	134,7	131,6	129,2	127,3	106,3
Maio	218,3	174,3	167,3	150,9	147,7	150,5	147,6	124,2
Junho	399,0	343,4	312,6	285,8	288,7	287,1	288,8	261,8
Julho	588,2	525,1	483,6	455,7	458,0	456,5	457,9	433,0
Agosto	632,7	570,8	533,0	506,8	508,8	504,2	506,9	483,6
Setembro	428,0	380,7	351,8	331,0	330,4	314,5	327,6	310,7
Outubro	277,2	241,1	233,7	205,8	206,4	189,6	197,1	191,3
Novembro	141,8	132,9	158,9	150,6	148,8	140,0	140,1	139,1
Dezembro	170,6	180,7	221,0	227,8	225,6	219,3	219,3	217,0
Total	3494,6	3207,4	3311,3	3206,8	3192,8	3109,4	3130,7	2961,6

Tabela A13 - Consumo de energia para arrefecimento longo do ano com parede orientada a sul e janela inclinada a 0°

	Consumo de energia para arrefecimento (kWh)					
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 6
Janeiro	2,5	1,8	2,9	1,1	1,1	1,0
Fevereiro	1,6	0,8	0,3	0,0	0,0	0,1
Março	9,3	5,0	1,9	0,8	1,0	1,2
Abril	61,9	41,9	19,3	17,3	18,2	17,6
Maio	221,9	174,5	91,6	95,4	96,1	89,9
Junho	413,0	354,9	240,6	243,9	250,8	239,9
Julho	581,1	517,4	397,7	399,2	407,2	395,6
Agosto	597,8	539,1	440,0	439,0	447,8	437,6
Setembro	375,6	336,6	276,0	271,2	280,1	274,3
Outubro	209,2	184,6	157,0	144,8	148,3	146,4
Novembro	30,8	25,6	23,4	18,9	18,9	18,8
Dezembro	1,0	0,8	0,8	0,4	0,4	0,4
Total	2505,7	2183,0	1651,5	1632,0	1670,0	1622,7

Tabela A14 - Consumo de energia para aquecimento ao longo do ano com parede orientada a sul e janela inclinada a 0°

	Consumo de energia para aquecimento (kWh)					
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 6
Janeiro	210,7	213,6	211,0	224,4	224,4	222,9
Fevereiro	153,3	160,6	170,6	180,4	180,0	177,2
Março	110,0	122,7	148,1	162,5	155,7	154,3
Abril	36,6	44,2	65,8	72,6	68,3	67,6
Maio	7,5	9,4	15,7	19,0	16,0	17,6
Junho	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2
Julho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	2,1	2,3	2,8	2,8	2,8	2,7
Novembro	68,4	70,1	68,7	74,5	74,5	73,9
Dezembro	154,7	157,5	153,3	165,7	165,7	164,3
Total	743,2	780,5	836,0	902,0	887,4	880,8

Tabela A15 - Consumo de energia para iluminação ao longo do ano com parede orientada a sul e janela inclinada a 0°

	Consumo de energia para iluminação (kWh)					
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 6
Janeiro	28,8	30,0	65,0	43,0	43,0	42,9
Fevereiro	20,0	20,7	46,3	30,6	31,2	30,6
Março	11,5	12,3	39,1	25,5	33,0	21,3
Abril	2,6	3,2	30,8	19,2	25,2	9,4
Maio	0,8	1,0	34,1	30,1	32,2	4,9
Junho	0,0	0,0	31,9	25,6	31,5	1,8
Julho	0,3	0,3	34,2	23,3	29,3	1,5
Agosto	1,6	1,8	41,5	22,5	29,5	6,4
Setembro	6,8	7,2	46,9	18,4	27,5	13,3
Outubro	17,7	18,6	67,2	25,7	29,7	25,6
Novembro	25,0	25,9	64,5	39,2	39,2	39,1
Dezembro	30,4	31,2	61,6	43,0	43,0	43,4
Total	145,4	152,1	563,2	346,0	394,3	240,1

Tabela A16 - Consumo de energia total ao longo do ano com parede orientada a sul e janela inclinada a 0°

mês	Consumo de energia total (kWh)					
	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 6
Janeiro	242,0	245,4	279,0	268,5	268,5	266,8
Fevereiro	174,8	182,1	217,2	211,0	211,3	207,8
Março	130,8	140,0	189,1	188,8	189,7	176,7
Abril	101,2	89,3	115,9	109,0	111,7	94,6
Maio	230,2	184,9	141,4	144,4	144,2	112,4
Junho	413,0	354,9	272,6	269,8	282,4	241,9
Julho	581,4	517,7	431,9	422,5	436,5	397,1
Agosto	599,4	540,9	481,5	461,5	477,3	443,9
Setembro	382,3	343,8	322,9	289,6	307,6	287,7
Outubro	228,9	205,4	227,0	173,3	180,8	174,8
Novembro	124,2	121,6	156,5	132,6	132,6	131,8
Dezembro	186,1	189,5	215,7	209,1	209,1	208,0
Total	3394,3	3115,6	3050,7	2880,1	2951,7	2743,6

Tabela A17 - Consumo de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a oeste e inclinada a 90°

mês	Consumo de energia para arrefecimento (kWh)							
	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	1,8	1,4	1,4	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
Fevereiro	0,6	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Março	2,6	1,5	1,3	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9
Abril	26,4	20,8	18,1	15,2	15,3	15,6	14,9	14,7
Maio	122,2	105,4	90,1	83,2	85,8	85,6	82,7	82,6
Junho	286,4	261,8	234,9	228,7	232,3	232,2	228,8	226,1
Julho	452,6	423,3	389,1	380,4	385,9	385,7	382,3	376,9
Agosto	484,8	456,3	429,5	422,7	426,2	426,7	422,9	417,6
Setembro	306,0	288,0	266,9	262,7	264,5	263,9	261,5	258,4
Outubro	169,1	158,0	145,6	142,5	144,4	143,1	143,4	140,1
Novembro	25,5	22,9	20,3	19,3	19,6	19,3	19,6	18,8
Dezembro	1,0	0,9	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Total	1879,1	1740,6	1598,4	1557,3	1576,5	1574,7	1558,5	1537,5

Tabela A18 - Consumo de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a oeste e inclinada a 90°

mês	Consumo de energia para aquecimento (kWh)							
	VD	VD low-E	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	219,8	215,9	223,1	223,2	223,9	223,2	223,9	223,0
Fevereiro	171,7	171,2	181,5	181,2	182,4	181,3	182,6	180,5
Março	143,2	147,5	163,3	163,5	163,6	162,9	165,9	162,0
Abril	60,9	65,5	77,9	78,2	77,4	77,0	78,8	74,3
Maio	12,2	13,4	18,9	18,8	18,3	18,4	18,5	17,0
Junho	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Julho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	2,6	2,6	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Novembro	73,4	72,3	75,0	74,4	74,3	74,4	74,3	73,8
Dezembro	159,9	157,7	166,0	165,9	165,7	165,9	165,7	164,8
Total	843,7	846,1	909,5	908,7	909,3	906,7	913,4	898,9

Tabela A19 - Consumo de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a oeste e inclinada a 90°

mês	Consumo de energia para iluminação (kWh)							
	VD	VD low-E	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	47,9	51,1	63,7	61,0	59,8	61,0	59,8	59,4
Fevereiro	35,3	38,0	51,8	50,0	48,4	49,8	48,1	47,4
Março	27,4	29,4	51,4	47,5	46,5	49,8	44,8	44,1
Abril	12,3	13,6	49,8	33,5	34,3	40,5	34,3	31,7
Maio	11,1	13,7	66,3	37,3	39,8	48,5	39,1	33,2
Junho	9,4	10,6	64,3	35,1	38,0	47,8	38,2	32,2
Julho	10,0	12,4	66,5	33,1	37,4	46,2	36,8	30,0
Agosto	14,0	15,3	68,6	37,7	39,7	47,7	39,0	34,2
Setembro	20,5	23,0	62,4	37,3	38,4	40,9	36,5	36,3
Outubro	32,7	34,8	69,9	50,1	52,0	50,4	50,7	50,5
Novembro	44,5	45,8	66,3	58,0	58,6	58,0	58,6	58,3
Dezembro	49,5	51,0	59,1	57,5	57,8	57,5	57,8	57,3
Total	314,7	338,7	740,1	538,1	550,7	598,0	543,7	514,6

Tabela A20 - Consumo de energia total ao longo do ano com janela orientada a oeste e inclinada a 90°

	Consumo de energia total (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	269,6	268,4	288,2	285,2	284,8	285,2	284,8	283,2
Fevereiro	207,6	209,5	233,5	231,2	230,8	231,1	230,7	227,9
Março	173,2	178,4	216,0	211,9	211,1	213,6	211,5	207,0
Abril	99,7	99,8	145,9	126,9	127,0	133,1	128,0	120,8
Maio	145,5	132,5	175,4	139,3	143,9	152,5	140,3	132,7
Junho	295,9	272,4	299,4	264,0	270,4	280,2	267,1	258,4
Julho	462,7	435,7	455,6	413,5	423,2	431,9	419,1	406,9
Agosto	498,7	471,7	498,1	460,5	466,0	474,4	461,9	451,8
Setembro	326,5	311,0	329,3	300,0	302,8	304,8	298,0	294,7
Outubro	204,4	195,4	219,1	196,0	199,8	197,0	197,5	194,0
Novembro	143,4	140,9	161,7	151,7	152,5	151,7	152,5	151,0
Dezembro	210,4	209,6	226,0	224,0	224,1	224,0	224,1	222,6
Total	3037,5	2925,4	3248,1	3004,1	3036,5	3079,5	3015,6	2951,0

Tabela A21 - Consumo de energia para arrefecimento ao longo do ano com janela orientada a este e inclinada a 90°

	Consumo de energia para arrefecimento (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	2,0	1,7	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1
Fevereiro	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Março	2,3	1,6	1,0	1,0	1,1	1,2	1,1	1,0
Abril	25,1	20,6	17,1	16,1	16,2	16,5	16,4	16,0
Maio	120,6	104,2	88,6	83,5	85,7	86,8	86,1	85,5
Junho	300,4	271,5	235,8	227,9	231,0	234,2	233,7	231,4
Julho	459,6	427,1	389,3	378,8	382,9	385,2	385,6	379,4
Agosto	498,7	465,9	430,9	421,2	425,0	428,3	428,1	420,9
Setembro	312,5	292,0	267,7	261,6	263,5	265,1	265,8	260,5
Outubro	169,7	158,0	145,4	141,1	141,0	141,5	142,1	138,5
Novembro	25,6	23,7	20,1	19,5	19,2	19,2	19,2	18,6
Dezembro	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Total	1917,4	1767,2	1597,8	1552,8	1567,7	1580,1	1580,2	1553,7

Tabela A22 - Consumo de energia para aquecimento ao longo do ano com janela orientada a este e inclinada a 90°

Consumo de energia para aquecimento (kWh)								
mês	VD	VD low-E	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	222,3	220,3	224,2	224,1	223,3	223,2	223,3	221,4
Fevereiro	169,5	171,7	181,6	181,6	180,2	180,3	180,1	177,6
Março	137,9	144,6	165,0	165,1	163,9	163,7	162,1	161,2
Abril	51,9	59,2	79,7	80,0	79,3	77,2	76,9	75,4
Maio	9,9	12,1	19,9	20,0	19,6	19,5	18,4	18,0
Junho	0,0	0,0	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
Julho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Agosto	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Setembro	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outubro	2,6	2,8	3,8	3,7	3,8	3,8	3,8	3,7
Novembro	71,6	72,3	75,7	75,4	76,5	76,4	76,5	75,6
Dezembro	160,8	159,6	166,6	166,5	166,8	166,8	166,8	165,1
Total	826,4	842,6	916,8	916,6	913,7	911,3	908,0	898,1

Tabela A23 - Consumo de energia para iluminação ao longo do ano com janela orientada a este e inclinada a 90°

Consumo de energia para iluminação (kWh)								
mês	VD	VD low-E	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	41,1	43,3	58,4	58,3	59,5	59,5	59,5	61,0
Fevereiro	30,9	32,7	47,1	47,3	48,8	48,7	49,3	49,6
Março	26,7	29,0	44,1	45,2	44,9	48,2	55,3	45,1
Abril	12,0	13,4	36,6	30,0	28,6	39,3	44,5	28,4
Maio	11,5	13,8	57,6	38,0	36,8	51,3	61,2	35,8
Junho	9,0	10,0	63,4	32,6	30,6	49,4	59,8	29,3
Julho	11,0	12,4	66,6	30,9	30,9	47,6	59,3	29,5
Agosto	13,1	13,9	67,6	32,0	31,5	46,1	55,7	31,0
Setembro	16,5	19,2	61,9	35,1	34,4	41,0	47,7	33,4
Outubro	31,2	32,9	67,8	45,9	45,0	46,4	49,0	45,3
Novembro	38,5	40,7	58,6	53,0	51,0	51,0	51,0	51,9
Dezembro	41,6	43,8	54,3	54,3	53,9	53,9	53,9	54,9
Total	283,1	305,0	684,2	502,6	496,0	582,4	646,3	495,3

Tabela A24 - Consumo de energia total ao longo do ano com janela orientada a oeste e inclinada a 90°

	Consumo de energia total (kWh)							
mês	VD	VD <i>low-E</i>	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5	EC 6
Janeiro	265,4	265,3	283,7	283,6	284,0	284,0	284,0	283,5
Fevereiro	200,7	204,5	228,8	229,0	229,1	229,1	229,5	227,3
Março	166,9	175,2	210,1	211,4	209,9	213,0	218,5	207,3
Abril	89,0	93,3	133,4	126,1	124,1	133,1	137,8	119,8
Maio	141,9	130,1	166,1	141,5	142,1	157,5	165,8	139,3
Junho	309,4	281,5	299,5	260,8	261,9	283,9	293,7	260,9
Julho	470,6	439,4	455,9	409,7	413,7	432,8	444,9	408,9
Agosto	511,8	479,7	498,6	453,2	456,5	474,4	483,7	452,0
Setembro	329,0	311,2	329,7	296,7	297,9	306,1	313,5	293,9
Outubro	203,6	193,8	217,0	190,6	189,8	191,7	194,9	187,5
Novembro	135,7	136,6	154,5	147,9	146,7	146,7	146,7	146,1
Dezembro	203,1	204,1	221,5	221,5	221,4	221,4	221,4	220,6
Total	3027,0	2914,7	3198,7	2972,1	2977,3	3073,7	3134,5	2947,0